

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta textilná



DIPLOMOVÁ PRÁCA

**Určení parametrů asynchronního motoru z laboratorních
měření**

**Determine parameters of induction motor from laboratory
measuring.**

2007

Katarína Lešková

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta textilní

Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií

Ústav mechatroniky a technické informatiky

Študijný obor: Oděvní technologie 3106T005

Zameranie: Řízení technologických procesů

**Určení parametrů asynchronního motoru z laboratorních
měření**

**Determine parameters of induction motor from laboratory
measuring.**

Katarína Lešková

Vedúci diplomovej práce: Doc.Ing. Eva Konečná, CSc.

Konzultant: Ing. Jiří Kubín, Ph.D.

Rozsah práce:

Počet strán: 52

Počet obrázkov: 16

Počet grafov: 7

Počet tabuliek: 3

Počet príloh: 1 CD

V Liberci 14. mája 2007

Prehlásenie

Prehlasujem, že predložená *diplomová* práca je pôvodná a spracovala som ju samostatne. Prehlasujem, že citácia použitých prameňov je úplná, že som v práci neporušila autorské práva (v zmysle zákona č. 121/2000 Sb. O práve autorskom a o právach súvisiacich s právom autorským).

Súhlasím s umiestnením *diplomovej* práce v Univerzitnej knižnici TUL.

Bol/a som zoznámený/a s tým, že na moju diplomovú prácu sa plne vzťahuje zákon č.121/2000 Sb. o práve autorskom, najmä § 60 (školní dielo).

Beriem na vedomie, že TUL má právo na uzavretie licenčnej zmluvy o užití mojej diplomovej práce a prehlasujem, že **s ú h l a s í m** s prípadným užitím mojej diplomovej práce (predaj, zapožičanie apod.).

Som si vedomá toho, že použiť svoju diplomovú prácu či poskytnúť licenciu k jej využitiu môžem len so súhlasom TUL, ktorá má právo odo mňa požadovať primeraný príspevok na úhradu nákladov, vynaložených univerzitou na vytvorenie diela (až do jej skutočnej výšky).

Beriem na vedomie, že si svoju diplomovú prácu môžem vyzdvihnúť v Univerzitnej knižnici TUL po uplynutí piatich rokov po obhajobe.

V Liberci, dňa 14. mája 2007

.....

Lešková Katarína

Pod'akovanie

Na tomto mieste by som chcela poďakovať Doc. Ing. E. Konečnej, CSc. za odborné vedenie, pomoc pri spracovaní diplomovej práce, za poskytnuté rady a informácie. Ďalej by som chcela poďakovať Ing. J. Kubínovi za rady a pomoc pri spracovaní praktickej časti.

Anotácia :

Táto diplomová práca sa zaoberá problematikou stanovenia vhodnej metódy na určenie parametrov náhradnej schémy asynchrónneho motora s kotvou nakrátko napájaného sínusovým napätím. V rámci diplomovej práce bolo prevedené porovnanie momentových charakteristík motoru získaných rôznymi výpočtovými metódami s nameranou momentovou charakteristikou. V závere bolo prevedené zhodnotenie použiteľnosti zvolených metód.

Annotation:

The aim of this diploma thesis is to propose the proper method for determination of parameters of an induction motor from laboratory measurements. The methods are based on the equivalent diagram of an induction motor. The comparison among speed-torque characteristics obtained from different calculation methods and from measurements was made. Usability of the selected methods was summarized in the conclusion.

Klíčové slová:

- asynchrónny motor
- sínusové napájanie
- odpor statorového vinutia
- momentová charakteristika
- uhlová rýchlosť
- odpor
- reaktancia

Obsah

Zoznam použitých skratiek.....	8
1 Úvod.....	10
2 Teoretická časť	12
2.1 Elektromechanické deje v asynchrónnych motoroch	12
2.2 Pracovné stavy elektrických pohonov	12
2.3 Stanovenie doby rozbehu.....	13
2.4 Prevedenie ASM	14
2.5 Princíp činnosti	15
2.6 Náhradná schéma.....	19
2.7 Výkon a momentová charakteristika	21
2.8 Metódy určenie parametrov asynchrónneho motora	25
2.9 Určenie strát	27
3 Experimentálna časť	31
3.1 Určenie parametrov náhradnej schémy asynchrónneho motora	32
3.2 Určenie parametrov zo štítkových hodnôt	34
3.3 Určení z pracovných bodov	37
3.3.1 Asynchrónny motor v stave nakrátko ($s = 1$).....	38
3.3.2 Meranie naprázdno ($s \rightarrow 0$)	40
3.3.3 Asynchrónny motor pri zaťažení	42
3.3.4 Určenie parametrov rotorových veličín	44
3.4 Asynchrónny motor pri nesínusovom napájaní	47
3.4.1 Meniče frekvencie.....	48
4 Záver	50
Zoznam použitej literatúry	52

Zoznam použitých skratiek a symbolov

n_s	synchrónne otáčky točivého magnetického poľa	$[\text{min}^{-1}]$
n	skutočné otáčky rotora	$[\text{min}^{-1}]$
n_2	zaostávanie rotora za točivým magnetickým poľom	$[\text{min}^{-1}]$
n_0	otáčky naprázdno	$[\text{min}^{-1}]$
p	počet polpárov	$[-]$
f_1	frekvencia statorového napätia	$[\text{Hz}]$
f_2	frekvencia rotorového napätia	$[\text{Hz}]$
s	sklz stroja	$[-]$
s_{zv}	sklz zvratu	$[-]$
s_k	sklz pre k-tu harmonickú	$[-]$
N_1, N_2	počet závitov fázy statora a rotora	$[-]$
ξ_{v1}, ξ_{v2}	faktory vinutia statora a rotora	$[-]$
U_1	napätie statorového vinutia	$[\text{V}]$
U_2	napätie rotorového vinutia	$[\text{V}]$
U_n	združené napätie statorového vinutia	$[\text{V}]$
I_n	združený prúd statorového vinutia	$[\text{A}]$
R_2	odpor jednej fázy rotorového vinutia	$[\Omega]$
R_1	odpor statorového vinutia	$[\Omega]$
$R_{2\sigma}'$	odpor rotorového vinutia prepočítaný na stator	$[\Omega]$
R_{Fe}	odpor rešpektujúci straty v železe	$[\text{A}]$
X_1	rozptylová reaktancia statorového vinutia	$[\Omega]$
$X_{2\sigma}'$	rozptylová reaktancia rotorového vinutia prepočítaná na stator	$[\Omega]$
X_m	hlavná reaktancia predstavujúca spoločný magnetický tok	$[\Omega]$
P	výkon	$[\text{W}]$
P_δ	výkon, ktorý prechádza cez vzduchovú medzeru	$[\text{W}]$
P_n	výstupný mechanický výkon na hriadeli motora	$[\text{W}]$
P_1	vstupný výkon – elektrický príkon	$[\text{W}]$
P_2	mechanický výkon	$[\text{W}]$
ω	uhlová rýchlosť	$[\text{s}^{-1}]$
ω_s	synchrónna uhlová rýchlosť	$[\text{s}^{-1}]$
I_2'	rotorový prúd prepočítaný na stator	$[\text{A}]$

R_2'	odpor rotorového vinutia prepočítaný na stator	[Ω]
M	moment	[N/m]
η	menovitá účinnosť	[-]
R_{12}, R_{23}, R_{31}	odpor medzi dvojicami svoriek	[Ω]
R_{sp}	odpor spúšťáča, resp. regulátora	[Ω]
$L_{\sigma 21}$	reaktancia medzi dvoma fázami	[mH]
ΔP_{Fe}	straty v železe	[W]
P_{Cu1}, P_{Cu2}	straty vo vinutí	[W]
P_{mech}	mechanické straty	[W]
P_{zz}	straty zmenou záťaže	[W]
M	moment	[N/m]
M_{zv}	moment zvratu	[N/m]
Z	impedancia	[Ω]
I_{In}	menovitý prúd jednej fáze	[A]
U_{In}	združené prírodné napätie	[V]
U_{lk}	znížené napätie nakrátko	[V]
τ_a	elektromagnetická časová konštanta	[ms]
ΔP_{j1k}	Jouleove straty v statorovom vinutí	[W]
ΔP_{j2k}	Jouleove straty v rotorovom vinutí	[W]
ΔP_0	straty naprázdno	[W]

1 Úvod

Asynchrónny motor je najčastejšie používaný typ elektromotora. Je to dané predovšetkým jeho dobrými prevádzkovými vlastnosťami. Asynchrónne stroje bežného prevedenia sú vyrábané hromadne, alebo vo veľkých sériách, čo prispieva k ich priaznivej cene. Podľa prevedenia rotora sa delia na stroje:

- s kotvou nakrátko,
- s kotvou vinutou (krúžkovou),
- s kotvou špeciálnou [1].

Asynchrónny motor je trojfázový indukčný motor, ktorý využíva silové pôsobenie statorového a rotorového napätia a rotorového prúdu pretekajúceho vo vinutí spojenom nakrátko. Trojfázový indukčný motor je jednoduchý, v prevádzke spoľahlivý a nevyžaduje žiadnu zvláštnu obsluhu a údržbu. Vyrába sa v širokom rozsahu výkonu od niekoľko wattov až do 20 MW s veľmi širokým rozsahom otáčok, od desiatok otáčok za minútu až po 100 000 ot/min.

Asynchrónny motor s kotvou nakrátko v porovnaní s jednosmernými strojmi vyniká jednoduchou konštrukciou a prakticky bezúdržbovou prevádzkou. Ich rozšírenie je spojené s rozvojom striedavých distribučných a napájacích energetických sietí. Predovšetkým v neregulovaných pohonoch sa využíva možnosť jednoduchého spúšťania priamym pripojením na sieť aj keď môže vzniknúť prúdový náraz a veľký odber jalového výkonu. Snaha o obmedzenie spúšťacieho prúdu a splnenie požiadavky na jednoduchý rozbeh i reguláciu viedla ku konštrukcii špeciálnych strojov buď s vinutým (krúžkovým) rotorom, alebo strojov špeciálnych (s vírovou kotvou, dvojistou kotvou a pod.) čím však zaniká hlavná výhoda jednoduchých asynchrónnych strojov s klieťkovým rotorom [7].

Asynchrónne motory majú však aj niektoré nevýhody. Medzi hlavné nevýhody patrí obtiažna regulácia rýchlosti asynchrónneho motora. To je dôvod, prečo sa prevažne používajú k pohonu zariadení, ktoré pracujú pri konštantnej rýchlosti ako napr. ventilátory, čerpadlá, žeriavy, pásové dopravníky apod., alebo pri zariadeniach u ktorých sa rýchlosť mení prevodovou skriňou [14].

Cieľ práce

Cieľom tejto diplomovej práce je navrhnúť a stanoviť vhodnú a nenáročnú metódu na určenie parametrov náhradného zapojenia asynchrónneho motora. Na určenie týchto parametrov je potrebná znalosť konštrukcie asynchrónneho motora a správne spojenie experimentálnych aj teoretických postupov spolu s využitím štítkových údajov. Určenie parametrov asynchrónneho motora nie je jednoduché z dôvodu, že nie je možné merať priamo na rotore nakrátko. Pri určovaní parametrov asynchrónneho motora je možné zmerať iba dve hodnoty, a to odpor statorového vinutia R_1 a rozptylovú reaktanciu statorového vinutia $X_{1\sigma}$. Ostatné hodnoty asynchrónneho motora je potrebné zistiť iným spôsobom. Na zistenie ostatných parametrov existuje veľa metód, no niektoré sú dosť obtiažne a preto by bolo dobré nájsť vhodnú metódu na spracovanie hodnôt.

K zisteniu parametrov je možné vychádzať iba z hodnôt zistených meraním a to konkrétne z merania naprázdno, nakrátko a z merania pri zaťažení.

2 Teoretická časť

2.1 Elektromechanické deje v asynchrónnych motoroch

Prechodným dejom nazývame chovanie zariadenia v čase ako následok, alebo odozvu na zmenu riadiaceho signálu, poruchovej veličiny alebo parametrov pohonov.

V elektropohonoch môže prebiehať:

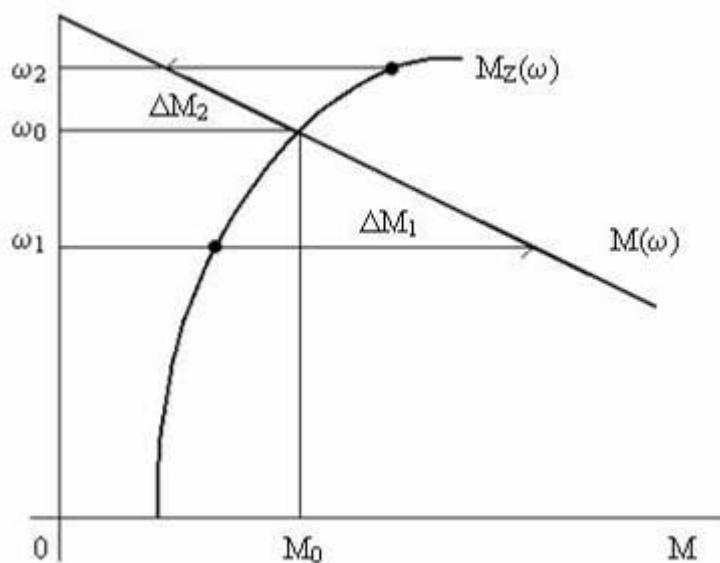
- **elektromagnetický prechodný dej** - pri ktorom sa menia elektrické a magnetické veličiny elektrického motoru. Tento prechodný dej dosiahne ustáleného stavu u bežných pohonov rádovo behom desiatok až stoviek milisekúnd
- **elektromechanický prechodný dej** – pri ktorom sa mení elektromagnetický moment a uhlová rýchlosť motoru. Tento prechodný dej dosiahne ustáleného stavu u bežných pohonov rádovo behom stoviek milisekúnd až desiatok sekúnd
- **tepelný prechodný dej** – pri ktorom sa mení oteplenie vinutia a magnetického obvodu motora a prípadne napájacieho transformátora. Tento prechodný dej dosiahne ustáleného stavu u bežných pohonov rádovo behom desiatok milisekúnd až desiatok minút

2.2 Pracovné stavy elektrických pohonov

Chovanie elektropohonov, tj. asynchrónneho motoru poháňajúceho záťaž, obecné popisuje pohybová rovnica v tvare:

$$M(\omega) - M_z(\omega) = J \cdot \varepsilon = J \cdot \frac{d\omega}{dt} \quad (1)$$

Elektromechanický prechodný dej prebieha vtedy, ak je uhlové zrýchlenie ε rôzne od nuly a pohon sa nachádza v ustálenom stave z hľadiska elektromechanického, ak je ε trvalé rovno nule.



Obr.1: Určenie dynamického momentu.

Na obrázku je do jedného diagramu nakreslená charakteristika hnacieho momentu $\omega(M)$ tak i zaťažovacieho momentu $\omega(M_z)$. Pri rýchlosti ω_0 sa obe charakteristiky pretínajú a platí $M = M_z = M_0$. Potom je ale uhlové zrýchlenie $\varepsilon = 0$ a pohon sa nachádza v ustálenom stave.

Ak sa bude pohon otáčať uhlovou rýchlosťou ω_1 , potom je moment hnací väčší ako moment záťažný a ich rozdiel ΔM_1 je kladný. Z rovnice (1) je tiež ε kladné a pohon bude zvyšovať svoju rýchlosť. Tento prechodný stav sa volá *rozbeh*.

Ak sa pohon bude otáčať uhlovou rýchlosťou ω_2 , potom je hnací moment menší ako moment záťažný a ich rozdiel ΔM_2 je záporný. Podľa rovnice (1) je ε záporné a pohon bude znižovať svoju rýchlosť. Tento prechodový dej sa nazýva *dobeh*. Rozbeh aj dobeh sú prechodné stavy, pri ktorých sa mení rýchlosť ω a končí ustáleným stavom, kedy rýchlosť dosiahne veľkosť ω_0 .

2.3 Stanovenie doby rozbehu

Ide o riešenie pohybovej rovnice pre konkrétnu závislosť dynamického momentu M_d , hnacieho momentu M a záťažného momentu M_z .

Pri konštantnom M_d prepíšeme pohybovú rovnicu do tvaru:

$$M(\omega) - M_z(\omega) = M_d = J \cdot \varepsilon = J \cdot \frac{d\omega}{dt} = \text{konst.} \quad (2)$$

Pre riešenie použijeme metódu separácie premenných a po integrácii dostaneme:

$$\int_{\omega_0}^{\omega} \delta\omega = \frac{1}{J} \left[\int_0^t M_d \cdot \delta t \right] \Rightarrow \omega - \omega_0 = \frac{M_d}{J} \cdot t \quad (3)$$

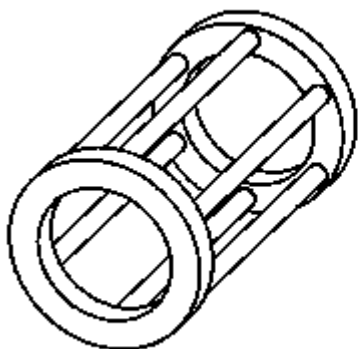
Pre určenie doby rozbehu t_r z počiatočnej rýchlosti ω_0 na konečnú rýchlosť ω_k použitím rovnice (3) dostaneme [1]:

$$t_r = J \cdot \frac{\omega_k - \omega_0}{M_d} \quad (4)$$

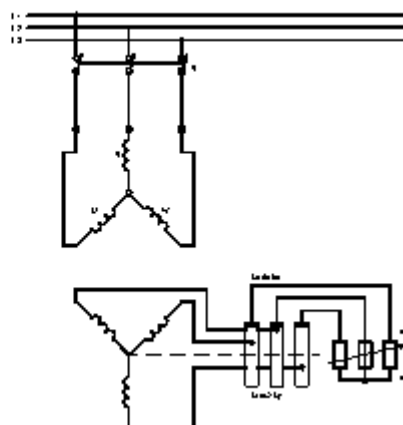
2.4 Prevedenie ASM

V statore je uložené trojfázové vinutie, ktoré vytvára točivé magnetické pole vo vzduchovej medzere. Malá vzduchová medzera (cca 0,1 mm) oddeľuje statorový a rotorový magnetický obvod. Jej veľkosť určuje magnetizačný prúd, ktorý sa odoberá zo siete.

Vinutie rotora je trojfázové (obr.2), na rozdiel od statorového trojfázového vinutia (obr.3) spojené nakrátko a uložené v drážkach. Počet pólov rotorového vinutia musí byť zhodný s počtom pólov statora [2].



Obr.2: Klietka nakrátko



Obr.3: Vinutý rotor

2.5 Princíp činnosti

Po pripojení asynchrónneho motora na napájacie napätie sa v každej fáze statora indukuje napätie, ktoré spôsobí indukciu napätia aj v každej fáze rotorového vinutia.

Napätie indukované v skratovanom rotorovom vinutí v ňom vyvolá prúd. Na rotorové vinutie, ktoré sa nachádza v magnetickom poli a preteká ním prúd, bude pôsobiť mechanická sila ako na každý prúdovodič v magnetickom poli. Na základe Lenzovho zákona sa vodiče začnú vychyľovať v smere otáčania sa magnetického poľa, usilujú sa totiž svojimi účinkami (znížením rýchlosti pohybu vodičov voči poľu) potlačiť príčinu, pre ktorú sa v nich indukuje napätie a tečie prúd.

Pri postupnom narastaní otáčok sa znižuje relatívny pohyb vodičov voči poľu, teda spomaľuje sa aj časová zmena magnetického toku viazaného vodičmi rotora a znižuje sa indukované napätie a prúd, v dôsledku čoho sa zníži mechanická sila pôsobiaca na vodič. Tak dochádza k ustáleniu otáčok rotora na určitej hodnote pod synchronnými otáčkami magnetického poľa. Samotný motor ani nemôže dosiahnuť synchronne otáčky, pretože pri nich by nebol relatívny pohyb vodičov voči poľu, nič by sa v nich neindukovalo, netiekol by prúd a nepôsobila by mechanická sila, vyvodzujúca točivý moment.

Z uvedeného vyplýva, že elektrická energia dodávaná sieťou do statora, sa prostredníctvom magnetického poľa prenáša na rotor a odtiaľ v mechanickej forme na hriadel poháňaného zariadenia. Teda stroj pracuje ako motor, vyvíja hnací točivý moment. V tomto stave má menšie otáčky ako synchronne.

O prevádzkových vlastnostiach stroja s obyčajnou klietkou nakrátko je možné vo všeobecnosti povedať, že počas rozbehu sú horšie a v chode lepšie. Sú to najmä pomery pri spúšťaní motora. Ide o obmedzenie prúdového nárazu a zvýšenie záberového momentu.

Prúdový náraz pri spúšťaní stroja s obyčajnou klietkou sa pohybuje v rozsahu 5 až 8-násobku nominálneho prúdu podľa veľkosti a počtu pólov. Záberový moment je asi 0,5 až 1,0 nominálneho momentu pri stroji s jednoduchou klietkou.

Konštrukcia klietkového stroja umožňuje robiť menšiu vzduchovú medzeru medzi statorom a rotorom, čo priaznivo vplýva na magnetizačný prúd, resp. prúd naprázdno.

Keď berieme do úvahy celkovú účinnosť stroja s kotvou nakrátko, je možné povedať, že je lepšia najmä pri menších strojoch, napr. okolo výkonu 5 kW je účinnosť klietkového motora asi 86 %. Z uvedeného vyplýva, že stroj s jednoduchou klietkou má mnoho

predností, a preto sa ho usilujeme používať ako pohonný motor všade tam, kde nie sú požiadavky na zmenu otáčok a kde to rozbehové vlastnosti dovoľia.

Najvhodnejší je rozbeh nezaťaženeho motora (motor naprázdno), pretože veľké prúdy v statore a rotore nepôsobia dlho čo znamená, že sa motor príliš neohreje. Pre ťažký, dlhotrvajúci a častý rozbeh je tento motor nevhodný [10].

Po pripojení trojfázového satorového vinutia na napájaciu sieť o frekvencii f_1 prúdy v satorovom vinutí vytvárajú vo vzduchovej medzere *točivé magnetické pole*. Rýchlosť otáčania tohto magnetického poľa závisí na frekvencii napájacej siete f_1 a na počte pólových dvojíc p .

Synchrónne otáčky točivého magnetického poľa vo vzduchovej medzere [3]:

$$n_s = \frac{60 \cdot f_1}{p} \text{ [min}^{-1}\text{]} \quad (5)$$

Indukčné čiary magnetického poľa pretínajú vodiče satorového a rotorového vinutia a indukujú v nich napätie. Napätie indukované v satorovom vinutí pôsobí proti napätiu siete, čím obmedzuje satorový prúd na hodnotu, pre ktorý je stroj zhotovený [10].

V nezaťaženom stave sa rotor otáča otáčkami naprázdno n_0 , ktoré sú takmer zhodné so synchrónnymi otáčkami n_s . V zaťaženom stave sú otáčky rotora n menšie než synchrónne otáčky n_s . Toto zaostávanie sa nazýva sklz vyjadrený relatívnou hodnotou:

$$s = \frac{n_2}{n_s} = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{f_2}{f_1} \quad (6)$$

kde: n skutočné otáčky rotoru,

n_2 zaostávanie rotora za točivým magnetickým poľom,

f_1 frekvencia satorového napätia,

f_2 frekvencia rotorového napätia.

Konkrétne hodnoty sklzu zaťaženého stroja sa pohybujú okolo 5 %, pri najmenších motoroch to býva až do 10 %, pri najväčších menej (až do 1 %).

Skutočné otáčky rotora ASM sú dané vzťahom:

$$n = n_s \cdot (1 - s) = \frac{60 \cdot f_1}{p} \cdot (1 - s) \quad [\text{min}^{-1}] \quad (7)$$

kde: f_1 napájacie napätie,

p počet polpárov,

s sklz stroja.

Elektrická energia odoberaná zo siete a vstupujúca do statora sa prostredníctvom magnetického poľa prenáša na rotor a odtiaľ v mechanickej forme na hriadeľ hnaného stroja [3].

Pre rotorovú frekvenciu platí vzťah:

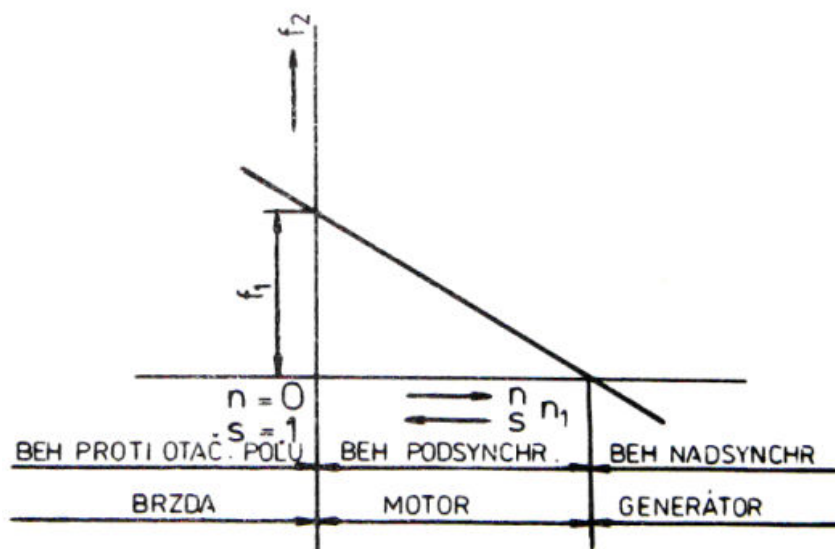
$$f_2 = \frac{p(n_s - n)}{60} \quad [\text{Hz}; \text{min}^{-1}] \quad (8)$$

Po úprave (rozšírením n_s):

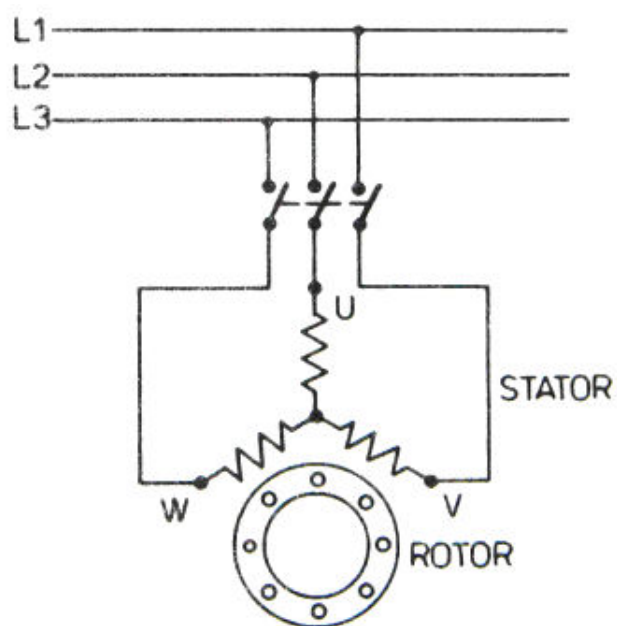
$$f_2 = \frac{n_s - n}{n_s} \cdot \frac{n_s p}{60} \quad [\text{Hz}; \text{min}^{-1}] \quad (9)$$

dostaneme vzťah pre kmitočet indukovaného prúdu v rotore:

$$f_2 = s f_1 \quad [\text{Hz}; \text{min}^{-1}] \quad (10)$$



Obr.4: Závislosť frekvencie f_2 od sklzu a otáčok.



Obr.5: Schéma zapojenia trojfázového asynchrónneho stroja s kotvou nakrátko.

2.6 Náhradná schéma

Z princípu pôsobenia asynchrónneho stroja vyplýva, že sa naň môžeme pozerat' ako na transformátor s otáčavým rotorovým magnetickým poľom, ktorého primárnou stranou je stator a sekundárnou stranou rotor. Prevod takéhoto transformátora je daný vzťahom:

$$p = \frac{N_1 \xi_{v1}}{N_2 \xi_{v2}} \quad (11)$$

kde: N_1, N_2 počet závitov fázy statora a rotora,
 ξ_{v1}, ξ_{v2} faktory vinutia statora a rotora.

Pri kreslení náhradnej schémy postupujeme analogicky ako pri transformátore, avšak je potrebné rešpektovať, že frekvencia na sekundárnej strane je teraz $f_2 = sf_1$. Tomu zodpovedá náhrada skutočného asynchrónneho motora stojatým strojom, ktorý má na výstupnej (rotorovej) strane záťaž čisto ohmického charakteru. Vo fáze rotora tohto stojaceho stroja je rozptylová reaktancia X_{r2} a celkový ohmický odpor R_2/s . Z hľadiska prúdových pomerov je takáto náhrada dovolená, lebo poskytuje rovnaké výsledky, ako sú na skutočnom stroji.

Odpor R_2/s možno rozdeliť na dve časti:

$$\frac{R_2}{s} = R_2 + \frac{1-s}{s} R_2 \quad (12)$$

pričom R_2 je odpor jednej fázy rotorového vinutia a $R_2 \cdot \frac{1-s}{s}$ je zaťažujúci odpor. Ak ešte zavedieme redukciu sekundárnych hodnôt na primárnu stranu podobne ako pri transformátore a uvažíme aj straty v železe, dostaneme pre asynchrónny motor náhradnú schému v tvare T - článku.

Redukcia sekundárnych veličín:

$$\mathbf{I}'_2 = I_2 \frac{N_2 \xi_{v2}}{N_1 \xi_{v1}}, \quad (13)$$

$$\mathbf{R}'_2 = \mathbf{R}_2 \left(\frac{N_1 \xi_{v1}}{N_2 \xi_{v2}} \right)^2, \quad (14)$$

$$\mathbf{X}'_{r2} = \mathbf{X}_{r2} \left(\frac{N_1 \xi_{v1}}{N_2 \xi_{v2}} \right)^2 \quad (15)$$

Podmienečné rovnice, vzťahujúce sa na túto náhradnú schému sú [10]:

$$U_1 = U_i + I_1(R_1 + j X_{1\sigma}) \quad [\text{V}] \quad (16)$$

$$0 = U_i + I'_2 \left(\frac{R'_2}{s} + j X'_{2\sigma} \right) \quad [\text{V}] \quad (17)$$

$$I_b = I_1 + I'_2 \quad [\text{V}] \quad (18)$$

$$I_b = I_m + I_z \quad [\text{V}] \quad (19)$$

Základné rovnice asynchrónneho motora pre stator a rotor je možné po zavedení reaktancie a sklzu zapísať v tvare:

$$U_1 = R_1 \cdot I_1 + j X_{1\sigma} \cdot I_1 + j X_{1h} \cdot I_2 \quad [\text{V}] \quad (20)$$

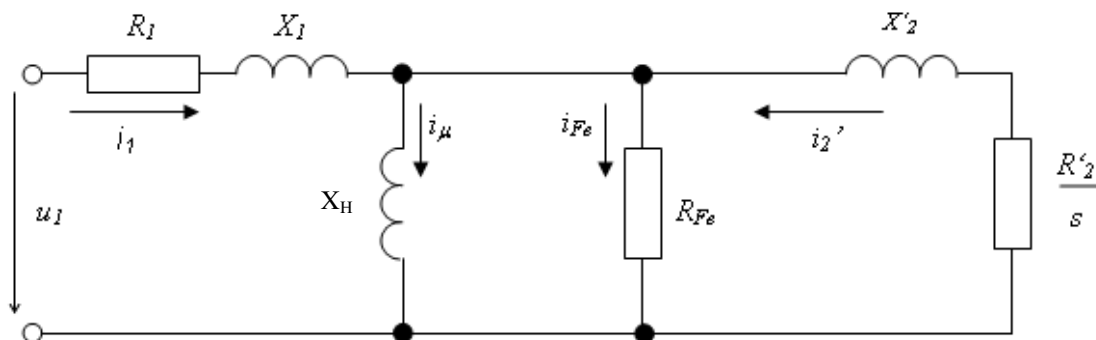
$$U_2 = R'_2 \cdot I_2 + j X'_{2\sigma} \cdot I_2 + j X_{2h} \cdot I_1 \quad [\text{V}] \quad (21)$$

Ďalej sú zavedené rozptylové indukčnosti a ako u transformátorov prepočítané rotorové napätia, prúdy a vzájomné indukčnosti na stator pomocou prevodu, indukčnosti a impedancie s kvadrátom prevodu.

$$U_1 = R_1 \cdot I_1 + j X_{1\sigma} \cdot I_1 + j X_h (I_1 - I_{21}) \quad [\text{V}] \quad (22)$$

$$U_{21} = R_{21} \cdot I_{21} + j s X_{2\sigma} I_2 - j s X_h (I_1 - I_2) \quad [\text{V}] \quad (23)$$

Na základe týchto rovníc je možné nakresliť známu náhradnú schému asynchrónneho motora v tvare T- článku [1].



Obr.6: Schématické usporiadanie asynchrónneho motora s kotvou nakrátko.

- kde: R_1 odpor statorového vinutia [Ω],
 R_2' odpor rotorového vinutia prepočítaný na stator [Ω],
 i_1 okamžitá hodnota statorového prúdu [A],
 i_2' rotorový prúd prepočítaný na stator [A],
 R_{Fe} odpor rešpektujúci straty v železe [Ω],
 $X_{1\sigma}$ rozptyľová reaktancia statorového vinutia [Ω],
 $X_{2\sigma}'$ rozptyľová reaktancia rotorového vinutia prepočítaná na stator [Ω],
 X_H hlavná reaktancia predstavujúca spoločný magnetický tok [Ω].

2.7 Výkon a momentová charakteristika

U motora ($1 \geq s \geq 0$) sa privádza na vstupné vinutie (stator) príkon P_1 , ktorého časť sa spotrebuje na Jouleove straty ΔP_{j1} a na straty v železe ΔP_{Fe1} . Zvyšná časť príkonu sa rovná výkonu vo vzduchovej medzere P_δ .

U generátora ($s < 0$) sa privádza na hriadeľ mechanický výkon P_2 , ktorý sa po odčítaní mechanických strát delí na premieňaný elektromechanický výkon, ktorý je s ohľadom na $s < 0$ väčší než výkon prenášaný vzduchovou medzerou na stator P_δ a na elektrický výkon v sekundárnom obvode.

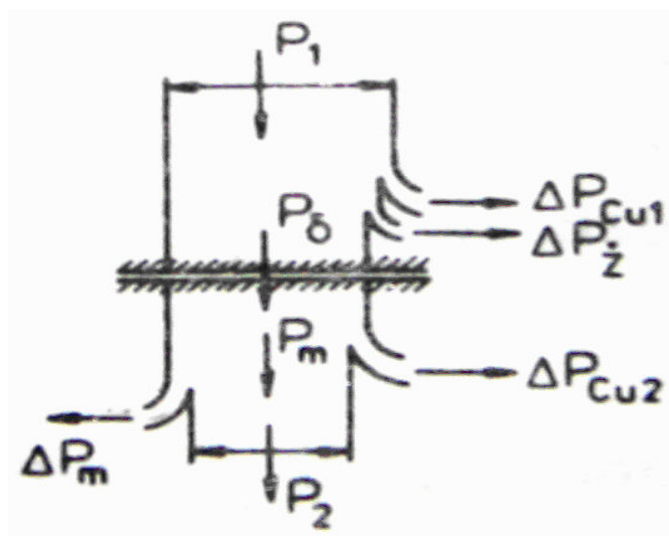
U asynchrónnej brzdy ($s > 1$) sa privádza na vstupné vinutie (stator) príkon P_1 , kde sa jeho časť spotrebuje na Jouleove straty ΔP_{j1} a straty v železe ΔP_{Fe1} . Na rotor sa zo statora prenáša výkon vo vzduchovej medzere P_δ . Na hriadeľ asynchrónnej brzdy sa privádza mechanický príkon P_m . Po odčítaní mechanických strát ΔP_m od príkonu P_m

dostaneme premieňaný elektromechanický výkon, ktorý je záporný ($s > 1$) a je do rotora dodávaný [14].

Trojfázový asynchrónny motor je voči sieti súmerným spotrebičom, preto sa jeho príkon dá vyjadriť vzťahom:

$$P_1 = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_n \cdot \cos \varphi_n \quad [\text{W}] \quad (24)$$

kde: U_n a I_n združené napätia a prúdy statorového vinutia
 $\cos \varphi_n$ účinník.



Obr.7: Výkonové pomery asynchrónneho motora.

Mechanický moment asynchrónneho motoru môžeme spočítať všeobecne zo vzťahu:

$$M = \frac{P_2}{\omega} \quad [\text{N.m}] \quad (25)$$

kde: P_2 mechanický výkon [W],
 ω uhlová rýchlosť,
 n otáčky motora [min^{-1}].

$$\omega = \frac{2\pi \cdot n}{60} \quad [\text{rad}^{-1}] \quad (26)$$

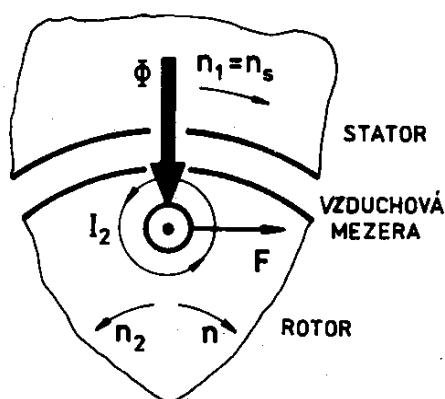
alebo pomocou rotorových strát:

$$M = \frac{P_\delta}{\omega_s} = \frac{P_{Cu2}}{\omega_s \cdot s} = \frac{3}{\omega_s} \cdot \frac{R_2'}{s} \cdot I_2'^2 \quad [\text{N.m}] \quad (27)$$

kde: P_δ výkon, ktorý prechádza cez vzduchovú medzeru [W],
 ω_s synchronná uhlová rýchlosť [s^{-1}],
 I'_2 rotorový prúd prepočítaný na stator [A],
 R'_2 odpor rotorového vinutia prepočítaný na stator [Ω].

$$\omega_s = \frac{2\pi n_s}{60} \quad [\text{rad}^{-1}] \quad (28)$$

kde: n_s synchronné otáčky motora [min^{-1}].



Obr.8: Vznik ťažnej sily asynchronného motora.

S rešpektovaním náhradnej schémy a s ohľadom na parametre statora je potom rotorový prúd daný vzťahom:

$$I'_2 = \frac{U_1}{\sqrt{\left\{ \left(R_1 + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + (X_{1\sigma} + X_{2\sigma})^2 \right\}}} \quad (29)$$

kde menovateľ udáva absolútnu hodnotu impedancie Z .

Rovnica momentovej charakteristiky $M = f(s)$ po dosadení za I'_2 do rovnice pre moment má tvar:

$$M = \frac{3}{\omega_s} \cdot \frac{R'_2}{s} \cdot I_2'^2 = \frac{3}{\omega_s} \cdot \frac{R'_2}{s} \cdot \frac{U_1^2}{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + (X_{1\sigma} + X_{2\sigma}')^2} \quad (30)$$

Táto rovnica určuje závislosť momentu na sklze a tým aj na otáčkach. Pri maximálnom momente (momente zvratu) sa príslušný sklz (*sklz zvratu* s_{zv}) určí z podmienky, že derivácia výrazu v menovateli vzťahu $M = f(s)$ je rovná nule. Potom je:

$$s_{\max} = s_{zv} = \pm \frac{R_2'}{\sqrt{(R_1^2 + X_{lk}^2)}}, \quad \text{kde: } X_{lk} = X_{\sigma 1} + X_{\sigma 2}' \quad (31)$$

Pre stroje nad 4 kW sa dá zanedbať odpor vinutia statora, $R_1 = 0$, potom je:

$$s_{\max} = s_{zv} = \pm \frac{R_2'}{X_{lk}} \quad (32)$$

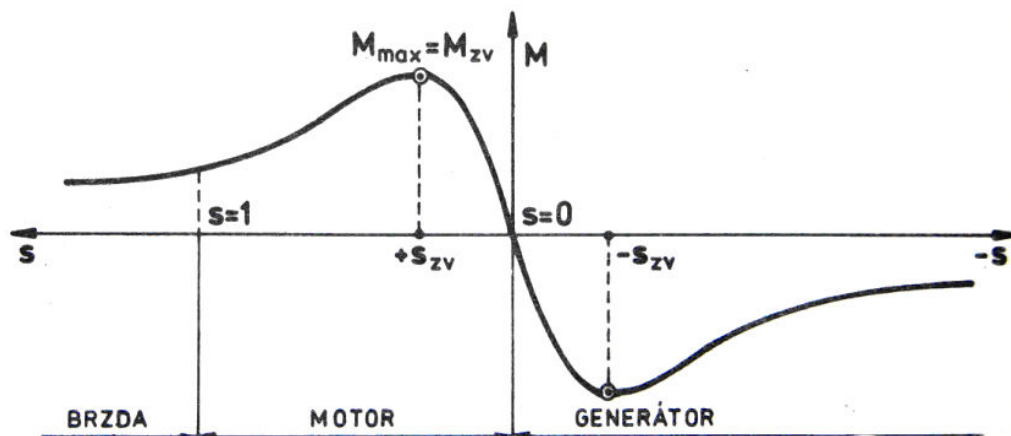
a maximálny moment asynchrónneho motora je:

$$M_{\max} = M_{zv} = \pm \frac{3}{\omega_s} \cdot \frac{U_1^2}{2(X_{1\sigma} + X_{2\sigma}')} \quad (33)$$

Úpravou predchádzajúcej rovnice pre moment dostaneme *Klossov vzťah*

$$M = \frac{2M_{zv}}{\frac{s}{s_{zv}} + \frac{s_{zv}}{s}} \quad (34)$$

pomocou ktorého je možné zostrojiť momentovú charakteristiku $M = f(s)$ asynchrónneho motora pre konštantné napätie. Keď je $s < s_{zv}$, je momentová charakteristika priamkou a pre $s > s_{zv}$ hyperbolou [3].



Obr.9: Priebeh momentu asynchrónneho stroja v závislosti na sklze.

Následne z predchádzajúcich vzťahov je možné vypočítať menovitú účinnosť a to ako podiel výstupného výkonu k vstupnému príkonu:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \quad [-] \quad (35)$$

kde: P_2 výstupný mechanický výkon na hriadeli motora [W],

P_1 vstupný výkon – elektrický príkon [W].

Pri chode naprázdno je účinnosť nízka. S rastúcim zaťažením sa rýchlo zväčšuje [11].

2.8 Metódy určenie parametrov asynchrónneho motora

Ak je potrebné posúdiť riadenie asynchrónneho motora pri rýchlych dynamických dejoch, najvhodnejšou metódou je simulácia pohonu, ktorá bez znalosti parametrov hnacieho asynchrónneho motora nie je možná. Väčšinou bývajú parametre považované pre ustálený stav za konštantné. V skutočnosti sa však pri chode mení rezistancia statora R_s a aj rotora R_r s teplotou a vplyvom skin-efektu. Teplota závisí na záťažnom prúde, na veľkosti odoberaného prúdu, frekvencii napájacieho napätia a magnetickom toku závisia aj reaktancie.

Metódy sú väčšinou aplikované na jednoduchú náhradnú schému asynchrónneho motora v tvare T, alebo Γ článku a výsledky sú prezentované so zjednodušujúcimi predpokladmi.

Metódy na identifikáciu môžeme rozdeliť :

- *on-line* – identifikácia sa prevádza za chodu stroja
- *off-line* – za kľudu stoja ($\omega = 0$)

Metódy môžu byť:

- *deterministické* - čo znamená prevádzať výpočty z presne definovaných vzťahov
- *stochastické* – motor je zapojený paralelne s identifikačným modelom. Motor aj jeho model majú spoločný vstup a na výstupe musí byť minimálny rozdiel

Prehľad metód

- *Stochastická metóda* – ide o off-line metódu, ktorá vychádza z náhradnej schémy asynchrónneho motora v tvare inverzného Γ -článku, ktorého parametre boli získané meraním nakrátko a naprázdno.
Do motora s neznámymi parametrami a identifikačného modelu vstupuje rovnaký napäťový signál. Výstup motora je porovnávaný s výstupom z modelu. V prípade odchýlky je vhodnou matematickou metódou prevedený odhad parametrov stroja, podľa ktorého sa upraví parametre modelu. Postup sa opakuje až dovtedy, kým je výstupná odchýlka minimálna. Vstupným signálom identifikačného modelu je napätie statora $U_s(s)$, výstupným prúd statora I_s .
- *On-line metóda* – Táto metóda vychádza z fyzikálneho modelu podľa klasického náhradného obvodu asynchrónneho motora. Parametre obvodu sú určené na základe on-line merania elektrických veličín motora. Časové priebehy veličín sa číslícovo spracujú a parametre motora v ustálenom stave vypočítajú na PC z nameraných časových postupností napätia a prúdu podľa ich matematických definícií.
- *Off-line metóda* – Táto metóda vychádza z rovníc matematického modelu ASM v ustálenom stave vyjadrených v komplexnom tvare.
Experimentálne výsledky vykazujú veľmi dobrú zhodu parametrov so skutočnými.

- *Časová metóda* – Metóda je založená na časovom modeli a analýze signálu prúdu motora, ktorý vyžaduje výpočet derivácií prúdu a napätia signálu generovaním do x-ovej osi. Parametre sú určené využitím algoritmu generovaných v neurónovej sieti. Do úvahy je brané aj sýtenie.
- *Deterministická metóda* – Pri napájaní z meniča s PWM sa určia parametre motora, ktoré sú ďalej porovnávané s hodnotami získanými pri nesínusovom napätí s:

a.) premenným prúdom a rýchlosťou \underline{a}

b.) sínusové napájanie s premenným napätím a frekvenciou

Účelom je zistiť závislosť parametrov motora na zaťažení a rotorovej frekvencii. Zmenou sýtenia magnetického obvodu sa menia aj parametre motora v závislosti na prevádzkovom stave. Náhradná schéma je klasická, sériová vetva s R_M a X_M nahradzuje paralelnú strednú vetvu s R_{Fe} a X_m . [14]

2.9 Určenie strát

Celkové straty motora sú zložené z nasledujúcich častí:

- straty v železe P_{Fe} ,
- straty vo vinutí P_{Cu1} , P_{Cu2} ,
- mechanické straty P_{mech} ,
- straty zmenou záťaže P_{zz} ,

Straty v železe sú súčtom strát vírivými prúdmi. Pre sínusový tok môžu byť straty P_{Fe} (W/kg) vyjadrené podľa vzťahu:

$$P_{Fe} = k_h f B_m^2 + k_e (f B_m)^2 = konšt. (k_h \frac{1}{f} + k_e) U^2 \quad (36)$$

kde B_m je maximálna hustota magnetického toku úmerná k vzduchovej medzere elektrického napätia U . Prvá časť reprezentuje hysterézne straty a časť druhá straty vírivými prúdmi.

Straty vo vinutí statora P_{Cu1}

$$P_{Cu1} = 3I_{RMS}^2 \cdot R_1 = 3R_1 I_1^2 + 3R_1 \sum_{k=2}^{\infty} I_{1k}^2 \quad (37)$$

Prvá časť strát je spôsobená základnou zložkou prúdu I_1 , ktorá bude o niečo vyššia z dôvodu zvyšujúceho sa magnetizačného prúdu. Druhá časť je výsledkom časových harmonických, ktoré sa vytvárajú v asynchrónnom motore pri napájaní z meniča frekvencie.

Straty vo vinutí rotoru P_{Cu2} spôsobené prúdom majú podobné vyjadrenie

$$P_{Cu2} = 3I_2^2 \cdot R_2 + 3 \sum_{k=2}^n I_{2k}^2 \cdot R_{2k} \quad (38)$$

Prvá časť reprezentuje straty sklzom. Druhá časť je spôsobená zložkami harmonického prúdu a je vypočítaná pre každý z ekvivalentných obvodov časových harmonických a potom sú jednotlivé časti spočítané. So skin- efektom musí byť počítane pre motory všetkých veľkostí z dôvodu výskytu vysokých rotorových frekvencií.

Mechanické straty P_{mech}

Tieto straty zahŕňajú vetranie a trenie. Môžu byť určené z grafu základného výkonu pohonu bez zaťaženia v závislosti na satorovom napätí.

Straty zmenou záťaže a straty v železe P_{zz} spočívajú v prírastku strát v železe a vírivými prúdmi, ktoré sú spôsobené prírastkami rozptylového toku vo vzduchovej medzere a stratou spôsobenou vysokou frekvenciou. [13].

Na rotor sa prenáša prostredníctvom otáčavého magnetického poľa výkon:

$$P_{\delta} = P_1 - P_{Cu1} - P_{Fe} \quad (39)$$

ktorý sa nazýva aj *výkon vo vzduchovej medzere*. Tento výkon sa ďalej rozdeľuje na elektrický výkon rotora P_{Cu2} a nemechanický výkon P_{mech} . Výkon P_{Cu2} zahŕňa vo všeobecnosti straty vo vinutí rotora a elektrický výkon vyvedený von z rotora, napr. do spúšťáča, resp. regulátora otáčok.

Teda:
$$\Delta P_{Cu2} = 3I_2^2 (R_2 + R_{sp}) \quad (40)$$

kde: I_2 rotorový prúd,

R_2 odpor fázy vinutia rotora,

R_{sp} odpor spúšťača, resp. regulátora.

Takže celkový mechanický výkon je:

$$P_{mech} = P_\delta - \Delta P_{Cu2} \quad (41)$$

Z neho sa malá časť stráca na krytie mechanických strát ΔP_{mech} , ktoré sú zapríčinené trením v ložiskách, trením kief o krúžky a ventiláciou stroja.

Užitočný výkon na hriadelí je $P_2 = P_{mech} - \Delta P_{mech}$.

Účinnosť stroja je daná pomerom:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - (\Delta P_{Cu1} + P_{Fe} + \Delta P_{Cu2} + \Delta P_{mech})}{P_1} \quad (42)$$

Konkrétne hodnoty účinnosti asynchrónnych motorov sa pohybujú v medziach (75 – 93%). V porovnaní s transformátormi majú asynchrónne motory horšiu účinnosť, čo spôsobuje prítomnosť vzduchovej medzery, nutnosť použiť dynamoplechy s vyššími stratami, ako majú transformátorové plechy, a taktiež mechanické straty, ktoré v transformátoroch neexistujú.

Použitím vzťahu medzi výkonom, točivým momentom a otáčkami

$$P = \omega M \quad (43)$$

kde $\omega = 2\pi n$, pričom n sú otáčky za sekundu, môžeme odvodiť závislosti medzi P_δ , P_{mech} a ΔP_{Cu2} touto úvahou:

Výkon vo vzduchovej medzere sa prenáša magnetickým poľom s otáčkami n_1 a otáčavým momentom M , teda platí:

$$P_\delta = 2\pi n_1 M \quad (44)$$

Elektrický výkon rotora sa prenáša tým istým momentom M , ale otáčky poľa voči rotoru sú $n_2 = s n_1$, teda platí:

$$\Delta P_{Cu2} = 2\pi n_2 M = 2\pi s n_1 M = s P_\delta \quad (45)$$

Podobne je možné vyjadriť celkový mechanický výkon motora otáčajúceho sa otáčkami n :

$$P_{mech} = 2\pi n M = 2\pi n_1 (1 - s) M = (1 - s) P_\delta \quad (46)$$

Z predchádzajúcich rovníc vyplýva:

$$P_\delta = P_{mech} + \Delta P_{Cu2} = (1 - s) P_\delta + s P_\delta \quad (47)$$

že výkon vo vzduchovej medzere sa rozdeľuje na mechanický a elektrický v závislosti od sklzu. Ak napr. stroj pracuje so sklzom 5 %, na mechanický výkon sa premieňa 95 % P_δ a elektrické straty v okruhu rotora dosahujú 5 % P_δ .

Keby sme však do rotora zaradili také odpory, že by stroj pracoval pri polovičných synchronných otáčkach (t.j. $s = 50$ %), len polovica výkonu P_δ by sa využila na mechanický výkon, zatiaľ čo druhá polovica P_δ by sa stratila do vinutia a na vonkajší odpor rotora.

Z toho vyplýva, že regulácia otáčok zmenou sklzu v širokých medziach nie je vhodná pre asynchrónny motor [10].

3 Experimentálna časť

3.1 Meracie pracovisko

Meranie bolo prevedené na pracovisku TUL, budovy B v učebni EL1 v laboratóriu ústavu mechatroniky a technickej informatiky.

1. Pohľad na meracie pracovisko:



2. Zdroj sínusového napätia s premennou frekvenciou – synchronný generátor



3.2 Určenie parametrov náhradnej schémy asynchrónneho motora

Určenie parametrov ASM s kotvou nakrátko je veľmi obtiažne. Dôvodom je to, že u tohto motora je možné zmerať iba dve veličiny a to odpor statorového vinutia R_1 a rozptylovú reaktanciu X_1 . Zvyšné parametre X_H , R_{Fe} , X'_2 , R'_2/s je potrebné vypočítať. Veľmi zriedkavo sú parametre udávané dodávateľom. Dôležité je, ako sú stanovené parametre motora. Môžu byť určené meraním, alebo zo štítkových hodnôt motora.

Všetky potrebné merania boli prevedené na asynchrónnom motore (typ: LA5106–6AA10–Z) firmy Siemens v laboratóriu ústavu mechatroniky a technickej informatiky, ktorý je súčasťou elektrického pohonu zabudovaného do meracieho stanovišťa.

Východiskom pre určenie parametrov boli odmerané hodnoty statora. Konkrétne ide o odpor statorového vinutia R_1 a rozptylovú reaktanciu statorového vinutia $X_{1\sigma}$.

- **Odpor statorového vinutia R_1**

Odpor statorového vinutia bol meraný na svorkách motora medzi dvojicami fázy, pretože motor má vyvedené jednotlivé fázy statorového vinutia na panely meracieho stanovišťa. Meranie odporu statorového vinutia je možné prevádzať Wheatstoneovým mostíkom, voltampérovou metódou, alebo digitálnym multimetrom. Meranie bolo prevedené už spomínanou voltampérovou metódou. Namerané hodnoty odporov, ktoré boli zmerané na dvojici svoriek motora boli zhodné. Zmeranú hodnotu je potrebné zmenšiť na polovicu. Dôvodom tohto zmenšenia je zapojenie statorového vinutia do hviezdy.

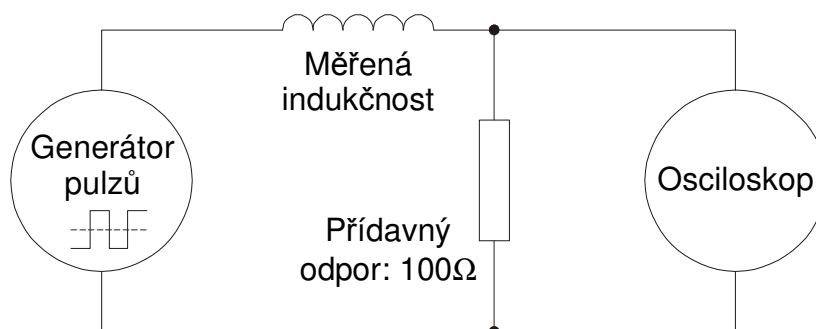
Namerané hodnoty odporov:

Meraná dvojica svoriek	R_{12}	R_{23}	R_{31}
Odpor (hviezda) R [Ω]	9,4	9,4	9,4

$$R_{12} = R_{23} = R_{31} = 9,4/2 = 4,7 \Omega$$

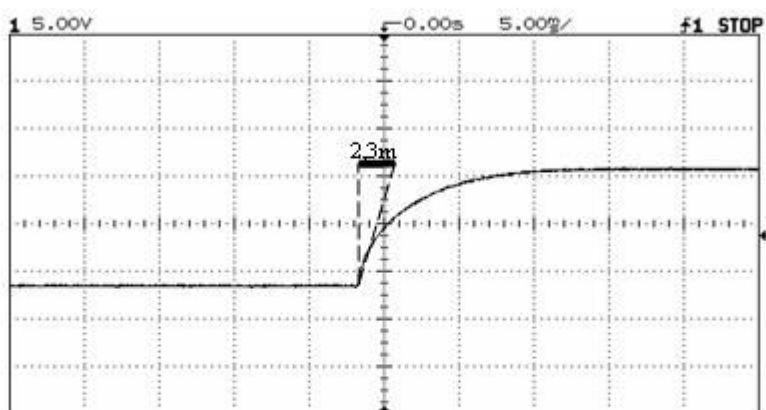
- **Rozptylová reaktancia satorového vinutia $X_{L\sigma}$**

Na zistenie reaktancie bola použitá oscilografická metóda. Osciloskop zaznamenal priebeh napätia sériového RL obvodu, ktorý bol napájaný obdĺžnikovými pulzmi zo striedavého generátora. Generovaný obdĺžnikový priebeh mal periódu 100ms čo je 10 Hz. Dotýčnicou k napäťovej krivke v obvode sa určila elektromagnetická časová konštanta $\tau = \frac{L}{R}$. Následne je možné vypočítať reaktanciu podľa vzťahu $L = \tau \cdot R$ kde prídavný odpor $R = 100 \Omega$.



Obr.10: Schéma zapojenia pre meranie rozptylovej reaktancie satorového vinutia.

Pri meraní rozptylovej reaktancie L asynchrónneho motora, boli získané tieto priebehy výstupného napätia pre všetky fáze satorového vinutia.



Obr.11 : Detail odozvy meraný medzi fázami $L_1 - L_2$.

Asynchronný motor je súmerný spotrebič, preto pre všetky fázy platí rovnaký priebeh krivky nárastu napätia čo znamená, že rovnaká je aj rozptylová reaktancia vypočítaná zo vzťahu $L = \tau \cdot R$, kde τ je časová konštanta odčítaná z odozvy nárastu napätia (obr.11).

Reaktancia medzi dvomi fázami statorového vinutia je:

$$L_{\sigma 21} = \tau \cdot R = 2,3 \cdot 100 = 230 \text{ mH}$$

Aj v tomto prípade sa rozptylová reaktancia statorového vinutia rovná polovici vypočítanej hodnoty.

$$L_{\sigma 21}/2 = 115 \text{ mH} \quad (L_{\sigma 1} = L_{\sigma 2} = L_{\sigma 3} = L_{\sigma 23}/2 = L_{\sigma 21}/2 = L_{\sigma 13}/2)$$

- **Odpor reprezentujúci straty v železe R_{Fe}**

Straty v železe boli určené z merania naprázdno podľa kriviek $\frac{I_{10}}{I_{1n}} = f(U_1)$

$$\Delta P_{Fe} = \frac{U^2}{R_{Fe}} = \frac{380^2}{R_{Fe}} \Rightarrow R_{Fe} = \frac{U^2}{\frac{1}{3} \cdot \Delta P_{Fe}} = \frac{380^2}{\frac{1}{3} \cdot 511} = 847,75 \Omega$$

3.3 Určenie parametrov zo štítkových hodnôt

Ďalšou možnou metódou pre určenie parametrov asynchronného motora je výpočet pomocou štítkových hodnôt.

Štítkové hodnoty sledovaného asynchronného motora:

Typ motora: LA5106–6AA10 – firmy Siemens.

$$P_n = 1,5 \text{ kW}$$

$$U_n = 220 \div 240/380 \div 400 \text{ V}$$

$$I_n = 3,9 \div 3,8/6,8 \div 6,6 \text{ A zapojení Y}/\Delta$$

$$f_n = 50 \text{ Hz}$$

$$\cos \varphi_n = 0,78$$

$$n_n = 925 \text{ ot.min}^{-1}.$$

Z uvedených štítkových hodnôt vychádzame pri určovaní ďalších veličín:

Počet pólových dvojíc: $p = 3$

Výpočet uhlovej rýchlosti :

$$\omega_n = \frac{n_n}{\left(\frac{60}{2 \cdot \pi}\right)} \quad (48)$$

Uhlové rýchlosti: $\omega_n = 96,9 \text{ rad/s} \rightarrow \text{pre } 925 \text{ ot/min}$

$\omega_0 = 104,7 \text{ rad/s} \rightarrow \text{pre } 1000 \text{ ot/min}$

Získané parametre zo štítkových hodnôt:

Účinnosť motora: $\eta = 74 \%$

– zo štítkových údajov. Je možné ju zistiť z merania, alebo z príručiek pre návrh a výpočet elektrických údajov daného výkonu.

Stratový výkon motora: $\Delta P_n = \frac{P_n(1-\eta_n)}{\eta_n} = \frac{1500(1-0,74)}{0,74} = 527W$

Straty naprázdno (v železe, mechanické, a dodatočné):

20 % celkových strát: $\Delta P_{10} = 0,2 \cdot \Delta P_n = 0,2 \cdot 527 = 105,4W$

Straty vo vinutí statora a rotora je možné pre predbežný návrh považovať za rovnaké a odhadnúť ich na 40 % strát celkových:

$$\Delta P_{Cu1} = \Delta P_{Cu2} = 0,4 \cdot \Delta P_n = 0,4 \cdot 527 = 210,8W$$

Pomocou týchto strát je možné stanoviť odpor jednej fáze vinutia statora R_1 a prepočítaný odpor rotora na stator R_{21} :

$$R_1 = R_{21} = \frac{0,4 \cdot \Delta P_n}{3 \cdot I_{1n}^2} = \frac{0,4 \cdot 527}{3 \cdot 3,85^2} = 4,74\Omega$$

Rozptylová reaktancia vinutia statora a rotora prepočítaná na stator sa určí z hodnoty prúdu nakrátko, kedy v príručkách alebo katalógoch motora je udávaný pomer $I_{1k}/I_{1n} = 5 \div 12$ (**voľba = 4**), potom:

$$I_{1k} = \frac{U_{1n}}{\sqrt{(R_1 + R_{21})^2 + (X_{1\sigma} + X_{\sigma 21})^2}} \quad (49)$$

z tejto rovnice:

$$X_{\sigma} = X_{\sigma 1} + X_{\sigma 21} = \frac{\sqrt{U_{1n}^2 - I_{1k}^2 \cdot (R_1 + R_{21})^2}}{I_{1k}} = \frac{\sqrt{220^2 - (4 \cdot 3,85)^2 \cdot (4,74 + 4,74)^2}}{(4 \cdot 3,85)} = 12 \Omega$$

Pre predbežný návrh je možné predpokladať, že $X_{\sigma 1} = X_{\sigma 21} = X_{\sigma}/2 = 12/2 = 6 \Omega$ a pre rozptylové indukčnosti statorového a rotorového vinutia platí: $X = \omega \cdot L$:

$$L_{\sigma 1} = L_{\sigma 21} = \frac{X_{\sigma}}{2} \cdot \frac{1}{\omega_1} = \frac{X_{\sigma}}{4 \cdot \pi \cdot f_{1n}} = \frac{12}{4 \cdot \pi \cdot 50} = 0,02 H$$

Hlavnú reaktanciu motora X_h a odpovedajúcu hodnotu vzájomnej indukčnosti L_h je možné určiť z hodnoty naprázdno I_{10} pre pomer $\frac{I_{10}}{I_{1n}}$ v závislosti na menovitom výkone a počte pólových dvojíc z kriviek v príručkách. Magnetizačný prúd motora býva o niečo menší než prúd naprázdno. Vo väčšine je menší asi o 2 %. Hodnotu hlavnej reaktancie je potom možné vypočítať zo vzťahu:

$$X_h = \frac{U_{1i}}{I_{10}} = \frac{U_{1n} \cdot (1 - \varepsilon_1)}{I_{10}} = \frac{220(1 - 0,02)}{2,262} = 95,3 \Omega$$

Moment zotrvačnosti motora je možné približne určiť podľa tzv. menovitej doby rozbehu v závislosti na výkone (podľa katalógu výrobcu, alebo príručiek):

$$J = \frac{T_j \cdot P_n}{\omega_{1s}^2} = \frac{0,065 \cdot 1500}{104,7^2} = 0,0089 \text{ kgm}^2$$

Sklz zvratu s_{zv} :

$$s_{zv} = \frac{R_{21}}{\sqrt{(R_1^2 + X_{\sigma}^2)}} = \frac{4,7}{\sqrt{(4,7^2 + 12^2)}} = 0,367 \quad \text{tj.}$$

$$1000 \text{ ot/min} - 380 \text{ ot/min} = 533 \text{ ot/min}$$

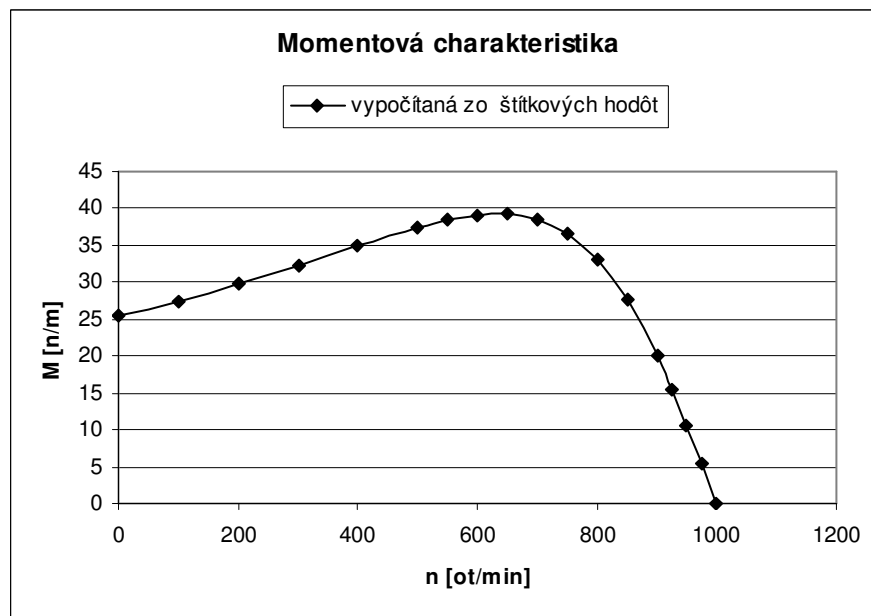
Moment zvratu M_{zv} :

$$M_{zv} = \frac{3}{\omega_s} \cdot \frac{U_1^2}{\left(R_1 + \frac{R_2}{s_{zv}}\right)^2 + X_{1\sigma}^2} \cdot \frac{R_2}{s_{zv}} = \frac{3}{\frac{2 \cdot \pi \cdot 1000}{60}} \cdot \frac{220^2}{\left[\left(4,74 + \frac{4,74}{0,367}\right)^2 + 12^2 \right]} \cdot \frac{4,74}{0,367} = 39,3 Nm$$

Elektromagnetická časová konštanta je definovaná ako pomer indukčnosti jednej fázy statorového vinutia a odporu vinutia tej istej fázy:

$$\tau_a = \frac{L_1}{R_1} = \frac{0,02}{4,74} = 4,22 ms$$

Takto vypočítané parametre môžu byť použité k zostrojeniu momentovej charakteristiky asynchrónneho motora.



Graf 1 :Momentová charakteristika zo štítkových hodnôt.

3.4 Určenie z pracovných bodov

Určenie parametrov rotora T – článku náhradnej schémy motora s kotvou nakrátko ako základ pre statický aj dynamický model vyžaduje náročné testy motora. Obvyklou metódou je meranie pri zaťažovaní motora, meranie nakrátko a naprázdno. U merania naprázdno a nakrátko je požadované napájanie sínusovým napätím. Zdrojom regulovaného sínusového napätia je regulačný 3 - fázový transformátor.

3.4.1 Asynchrónny motor v stave nakrátko ($s = 1$)

Motor pracuje nakrátko ak rotor stojí, čo znamená, že otáčky motora sú nulové. V rotorových vodičoch sa indukuje veľký skratový prúd I_{Ik} s rotorovým sieťovým kmitočtom f_2 . Veľkosť skratového prúdu je obmedzená impedanciou vinutia statora Z_s a rotora Z_r . Meranie nakrátko sa prevádza pri úplnom zabrzdení motora. Prúd nakrátko (v okamžiku rozbehu motora tzv. záberný prúd) je teda v porovnaní so menovitým prúdom podstatne väčší [9].

Platí:
$$I_{Ik} = \frac{U_1}{Z} \quad (50)$$

kde:
$$Z = (R_1 + R_2) + j(X_1 + X_2) \quad (51)$$

Motor bol pre frekvenciu $f = 50$ Hz napájaný zo siete autotransformátorom znížením napätím U_{Ik} pri menovitom prúde. Tomuto prúdu odpovedá združené napätie $U_{Ik}=113V$. Z pomeru napätia a prúdu je možné určiť prúd nakrátko. Prúd nakrátko sa určuje podľa pomeru napätia, pretože pri chode nakrátko sa privádzaná energia mení vo vinutí rotora a statora v Jouleovo teplo.

$$I_{Ik} = I_{In} \cdot \frac{U_{In}}{U_{Ik}} = 3,85 \cdot \frac{380}{115} = 12,72 \text{ A}$$

kde: I_{In} menovitý prúd jednej fázy,

U_{In} združené prírodné napätie,

U_{Ik} znížené napätie nakrátko.

Z nameraných hodnôt napätia, prúdu, činného a jalového výkonu, skutočného účinníka PF za zdánlivého výkonu boli pre frekvenciu 50 Hz určené straty nakrátko ΔP_k .

Straty nakrátko pozostávajú z týchto častí: $\Delta P_k = \Delta P_{j1k} + \Delta P_{j2k} + \Delta P_{Fe} = 6520 \text{ W}$

Hodnoty boli odčítané z charakteristiky nakrátko pre napätie 380V.

Kde ΔP_{j1k} sú Jouleové straty v satorovom vinutí. Tie sa vypočítajú z fázového prúdu a napätia.

$$\Delta P_{j1k} = 3 \cdot R_{1f} \cdot (I_{1kf})^2 = 3 \cdot 4,7 \cdot (12,7)^2 = 2274,2 \text{ W}$$

ΔP_{j2k} sú Jouleové straty v rotorovom vinutí. V prípade merania nakrátko ich môžeme považovať za rovnaké ako Jouleové straty v satorovom vinutí.

$$\Delta P_{j2k} = \Delta P_{j1k} = 2274,2 \text{ W}$$

ΔP_{Fe} sú straty v železe. Určia sa odčítaním strát v satorovom a rotorovom vinutí od celkových strát nakrátko.

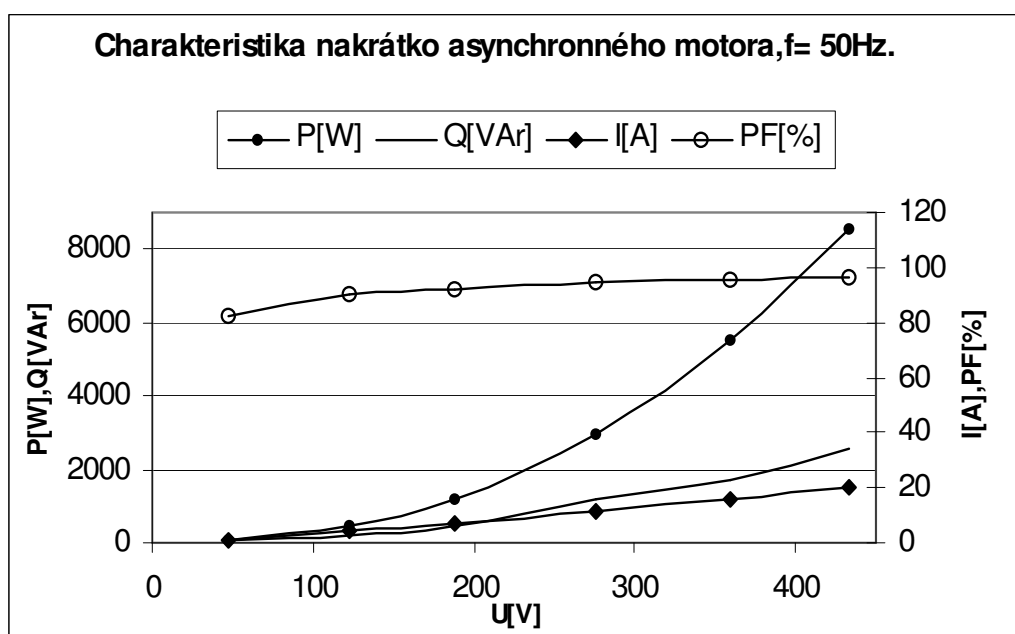
$$\Delta P_{Fe} = \Delta P_k - \Delta P_{j1k} - \Delta P_{j2k} = 6250 - 2274,2 - 2274,2 = 1701,6 \text{ W}$$

Namerané hodnoty (tab.1) boli zaznamenané analyzátorom výkonu PA 4400.

Tab.1. Namerané hodnoty v chode nakrátko

U [V]	433,8	380	360	276	188	122,8	46,8
S [VA]	8872	6657,6	5747	3103	1296,8	498,9	53,81
I [A]	20,45	17,52	15,964	11,23	6,883	4,061	1,1509
PF [1][*]	0,962	0,960	0,955	0,943	0,921	0,898	0,819
P₁ [W]	8537	6520	5491	2927	1195,5	448,3	44,08
f [Hz]	49,74	49,91	49,93	49,84	49,89	49,88	49,97
Q [Var]	2541	2050	1694,4	1154	491,7	220,5	33,5

Poznámka: Pri sínusovom napájaní činiteľ PF odpovedá $\cos \varphi$.



Graf 2: Charakteristika motora nakrátko pre frekvenciu 50 Hz.

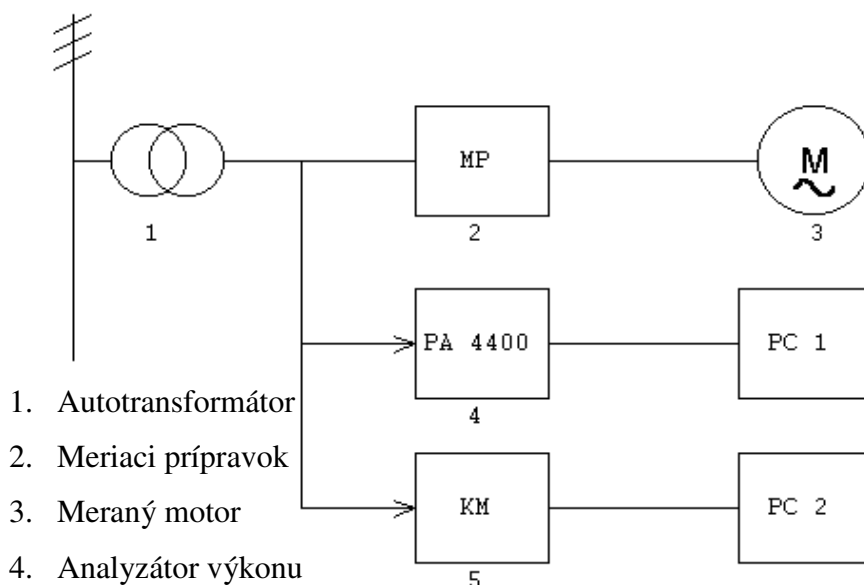
3.4.2 Meranie naprázdno ($s \rightarrow 0$)

Indukčný motor je pripojený k trojfázovej sieti bez zaťaženia. U asynchrónneho motoru sa pri chode naprázdno rotor otáča takmer synchronnými otáčkami, pretože sa zanedbávajú straty mechanické a straty v železe. Rotor vzhľadom k točivému magnetickému poľu stojí a v jeho vinutí sa neindukuje napätie. Vodičom rotora neprechádza prúd a motor nevytvára točivý moment.

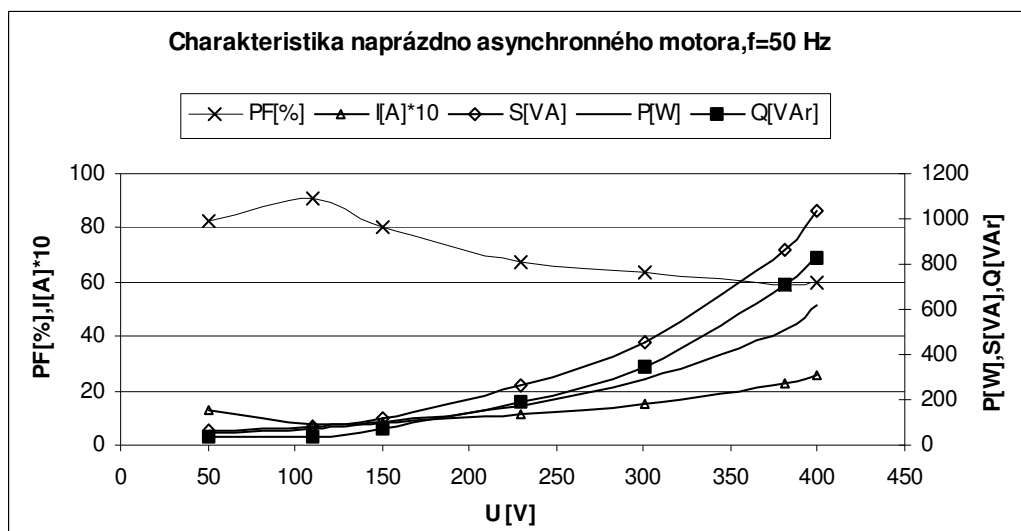
Pri chode naprázdno motor dodáva určitý výkon na pokrytie mechanických strát, strát v železe a vo vinutí statora. Otáčky motora pri chode naprázdno sa blížia k synchronným otáčkam točivého magnetického poľa. To znamená, že sklz a rotorový prúd sú malé.

Tab.2 :Namerané hodnoty v stave naprázdno:

U [V]	50,22	110,13	150,4	230	300,4	380,7	400
S [VA]	66,14	80,17	120,48	260,8	453,6	861,2	1036,8
I [A]	1,317	0,7285	0,8034	1,1349	1,5106	2,262	2,592
PF [%]*	82,3	90,8	80,2	67,7	63,8	59,3	59,6
P [W]	54,44	72,83	96,73	176,59	289,4	511,4	618,2
f [Hz]	50,03	50	50,02	50,04	50,04	50,03	50,01
Q [Var]	36,15	33,44	71,75	191,82	345,5	710,4	828,4



Obr.12: Schéma merania naprázdno pre frekvenciu 50 Hz.



Obr.10 - Charakteristika naprázdno motora pro frekvenciu 50 Hz

Straty naprázdno

ΔP_0 sú určené z charakteristík naprázdno pre menovité napätie 380V a frekvenciu 50 Hz. Straty naprázdno sa skladajú z malých strát Jouleových v satorovom ΔP_{j10} a rotorovom vinutí ΔP_{j20} , mechanických ΔP_m a v železe ΔP_{Fe} .

$$\Delta P_0 = \Delta P_{j10} + \Delta P_{j20} + \Delta P_m + \Delta P_{Fe} = 510 \text{ W}$$

Jouleove straty satorového a rotorového vinutia

Tieto straty sú spôsobené prechodom prúdu satorovým vinutím. Vypočítajú sa podľa vzťahu:

$$\Delta P_{j10} = 3 \cdot I_{10}^2 \cdot R_{1f} = 3 \cdot 2,262^2 \cdot 4,7 = 72 \text{ W}$$

Predpokladáme, že $\Delta P_{j10} = \Delta P_{j20}$

Straty v železe

Straty predstavujú straty hysterézne a straty vírivými prúdmi v železe satora aj rotora. V prípade meraného asynchronného motora boli tieto straty určené z charakteristiky naprázdno pomocou *extrapolácie* tzn. priesečníkom krivky strát a zvislej osi.

$$\Delta P_{Fe} = \Delta P_0 - \Delta P_{j10} - \Delta P_{j20} - \Delta P_m = 510 - 72 - 72 - 50 = 316 \text{ W}$$

Straty mechanické

Straty mechanické predstavujú straty ventilačné a straty trením v ložiskách.

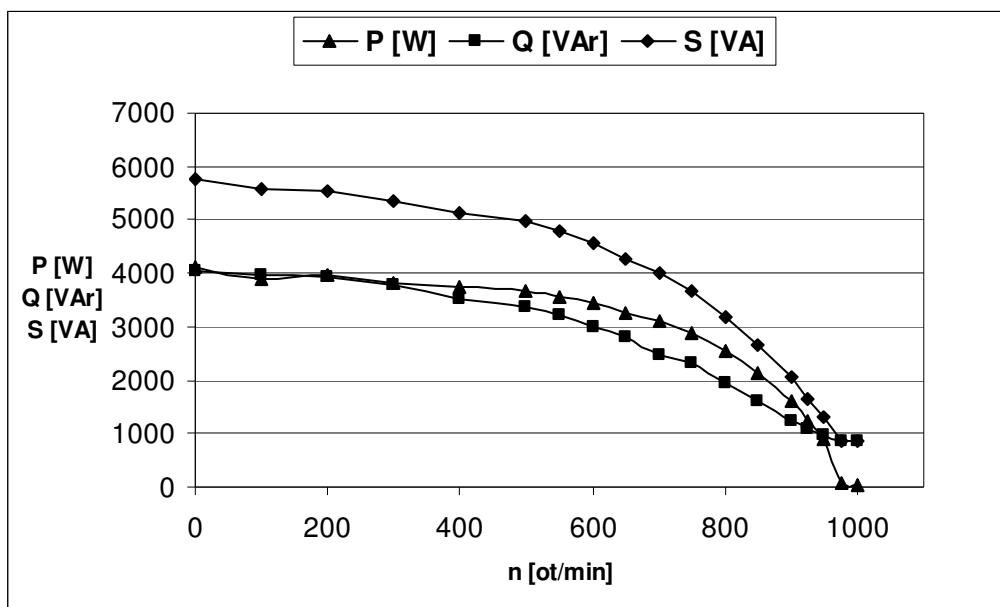
$$\Delta P_m = 50 \text{ W}$$

3.4.3 Asynchrónny motor pri zaťažení

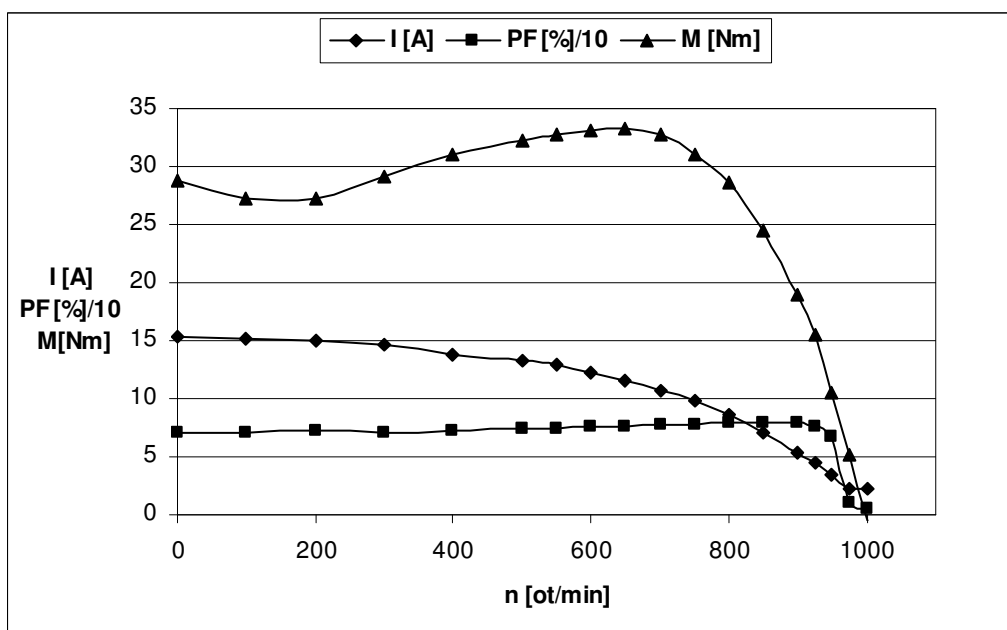
Asynchrónny motor bol zaťažený jednosmerným strojom, ktorý je na meracom stanovišti cez spojku pevne spojený s hnacím asynchrónnym motorom a brzdi ho. Namerané hodnoty sú v tab. 3.

Tab.3:Namerané hodnoty pri zaťažení

n[ot/min]	U[V]	S[VA]	I [A]	PF[% /10	P [W]	Q[VAr]	P021	M _{reg} [Nm]
1000	380,4	877,5	2,307	0,51	45,0	876,2	-3	-0,545
975	381,4	852,0	2,234	1,07	91,7	846,8	28	5,0909
950	377,9	1325,0	3,506	6,74	893,2	974,5	58	10,545
925	375,2	1649,6	4,397	7,53	1242,9	1084,6	85	15,455(tj.)
900	378,6	2054,4	5,426	7,87	1618,3	1226,3	104	18,909
850	376,2	2672,2	7,103	7,97	2132,2	1618,6	135	24,545
800	373,3	3192,5	8,553	7,99	2552,4	1929,9	157	28,545
750	375,0	3674,9	9,8	7,8	2866,5	2326,5	171	31,091
700	373,1	3991,2	10,698	7,75	3097,8	2463,0	180	32,727
650	372,0	4283,7	11,514	7,63	3273,2	2826,2	183	33,273
600	371,5	4557,1	12,266	7,53	3437,4	3002,2	182	33,091
550	371,9	4797,1	12,9	7,4	3549,0	3202,2	180	32,727
500	373,4	4962,1	13,288	7,39	3668,5	3386,9	177	32,182
400	370,7	5129,9	13,84	7,32	3755,1	3509,1	171	31,091
300	367,4	5359,9	14,59	7,15	3833,0	3765,5	160	29,091
200	370,1	5557,6	15,015	7,16	3982,0	3921,4	150	27,273
100	365,1	5566,6	15,246	7,01	3905,8	3976,8	150	27,273
0	373,3	5754,5	15,417	7,12	4103,2	4056,5	158	28,727



Graf 4: Zaťažovacie charakteristiky P , Q , $S = f(n)$.



Graf 5: Zaťažovacie charakteristiky I , $\cos \varphi = f(n)$ a momentová charakteristika $M = f(n)$.

Určenie príkonu

Hodnoty pri menovitých otáčkach.

$$P_1 = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_n \cdot \cos \varphi_n = \sqrt{3} \cdot 375,2 \cdot 4,4 \cdot 0,74 = 2115W$$

Určenie mechanického výkonu

Vychádzalo sa z hodnôt pri menovitých otáčkach.

$$P_2 = \frac{M \cdot n}{9,55} = \frac{15,38 \cdot 925}{9550} = 1,49 \text{ kW}$$

Menovitý moment

$$M_n = 9,55 \cdot \frac{P}{n} = 15,48 \text{ Nm}$$

Účinnosť stroja

Účinnosť sa vypočíta z podielu mechanického výkonu P_2 k príkonu P_1 .

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{1,49}{2,115} = 0,70$$

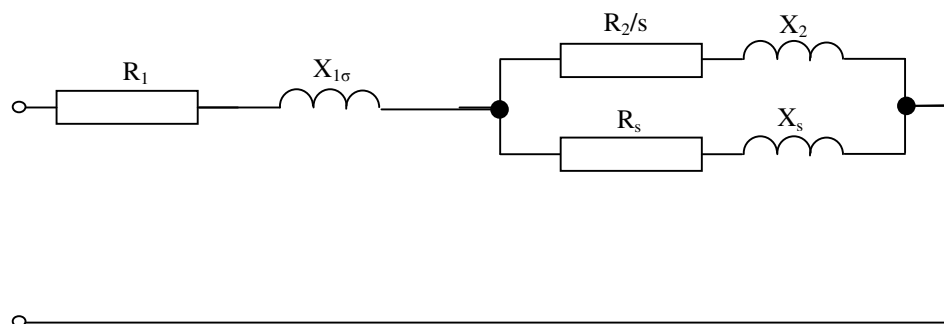
3.4.4 Určenie parametrov rotorových veličín

V tomto prípade určovania vychádzame z náhradnej schémy, ktorá je uvedená na obr.8. Frekvencia sa nemení.

Meraný asynchrónny motor je mechanicky pripojený k rovnosmernému motoru, ktorý ho zaťažuje.

Hodnoty odporu R_1 a reaktancie $X_{1\sigma}$ zistíme meraním. Hodnotu odporu, ktorá reprezentuje straty v železe R_{Fe} dokážeme pomerne jednoducho zistiť z merania naprázdno.

Pre uľahčenie výpočtov sa stredná vetva paralelného zapojenia (obr.6) prekreslila na zapojenie sériové (obr.13).



Obr. 13: Náhradná schéma asynchrónneho motora s upraveným sériovým zapojením pri meraní naprázdno .

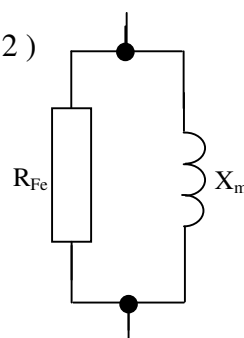
Prepočet paralelného na sériové zapojenie:

$$R_s + jX_s = \frac{R_{Fe} \cdot (X_m)^2}{(R_{Fe})^2 + (X_m)^2} + j \frac{(R_{Fe})^2 \cdot X_m}{(R_{Fe})^2 + (X_m)^2} \quad (52)$$

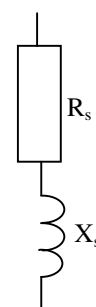
kde:

$$R_s = \frac{R_{Fe} \cdot (X_m)^2}{(R_{Fe})^2 + (X_m)^2} \quad (53)$$

$$X_s = \frac{(R_{Fe})^2 \cdot X_m}{(R_{Fe})^2 + (X_m)^2} \quad (54)$$



Obr. 14: Paralelné zapojenie.



Obr. 15: Sériové zapojenie.

Ako základný vzťah, z ktorého budeme vychádzať vezmeme:

$$Z = R_1 + jX_1 + \frac{(R_s + jX_s) \left(\frac{R_{2s}}{s} + jX_{2s} \right)}{(R_s + jX_s) + \left(\frac{R_{2s}}{s} + jX_{2s} \right)} \quad (55)$$

Úpravou vzťahu (55) sme dostali:

$$\frac{\left(R_s \cdot \frac{R_{2s}}{s} - X_s \cdot X_{2s} \right) + j \left(X_s \cdot \frac{R_{2s}}{s} + R_s \cdot X_{2s} \right)}{(R_s + j \cdot X_s) + \left(\frac{R_{2s}}{s} + jX_{2s} \right)} \quad (56)$$

Pomocou vhodných substitúcií bola rovnica (56) upravená tak, aby bola oddelená reálna od imaginárnej časti:

$$Z = R_1 + \frac{\left(R_s \cdot \frac{R_{2s}}{s} - X_s \cdot X_{2s} \right) \cdot \left(R_s + \frac{R_{2s}}{s} \right) + \left(X_s \cdot \frac{R_{2s}}{s} + R_s \cdot X_{2s} \right) \cdot (X_s + X_{2s})}{\left(R_s + \frac{R_{2s}}{s} \right)^2 + \left(X_s + \frac{R_{2s}}{s} \right)^2} +$$

$$+ j \left[X_{1\sigma} + \frac{\left(-R_s \cdot \frac{R_{2s}}{s} + X_s \cdot X_{2s} \right) \cdot (X_s + X_{2s}) + \left(X_s \cdot \frac{R_{2s}}{s} + R_s \cdot X_{2s} \right) \cdot \left(R_s + \frac{R_{2s}}{s} \right)}{\left(R_s + \frac{R_{2s}}{s} \right)^2 + \left(X_s + \frac{R_{2s}}{s} \right)^2} \right] \quad (57)$$

Úpravou a rozložením na reálnu a imaginárnu časť sme došli k dvom rovniciam o dvoch neznámych.

$$Z \cdot \cos(\theta) = R_1 + \frac{\left(R_s \cdot \frac{R_{2s}}{s} - X_s \cdot X_{2s}\right) \cdot \left(R_s + \frac{R_{2s}}{s}\right) + \left(X_s \cdot \frac{R_{2s}}{s} + R_s \cdot X_{2s}\right) \cdot (X_s + X_{2s})}{\left(R_s + \frac{R_{2s}}{s}\right)^2 + \left(X_s + \frac{R_{2s}}{s}\right)^2} \quad (58)$$

$$Z \cdot \sin(\theta) = X_{1\sigma} + \frac{\left(-R_s \cdot \frac{R_{2s}}{s} + X_s \cdot X_{2s}\right) \cdot (X_s + X_{2s}) + \left(X_s \cdot \frac{R_{2s}}{s} + R_s \cdot X_{2s}\right) \cdot \left(R_s + \frac{R_{2s}}{s}\right)}{\left(R_s + \frac{R_{2s}}{s}\right)^2 + \left(X_s + \frac{R_{2s}}{s}\right)^2} \quad (59)$$

Riešenie tejto sústavy rovníc bolo prevedené v programe MathCad.

$$\text{Výpočet sklzu zvratu I: } s_{zv} = \pm \frac{R_2'}{\sqrt{(R_1')^2 + X_{1k}^2}} \quad (60)$$

$$\text{Momentová charakteristika podľa Klossovho vzťahu: } M = \frac{2 \cdot M_{zv}}{\frac{s}{s_{zv}} + \frac{s_{zv}}{s}} \quad (61)$$

Na základe literatúry [15] je možné deriváciou menovateľa rovnice (48) previesť výpočet sklzu zvratu i podľa nasledujúceho vzťahu:

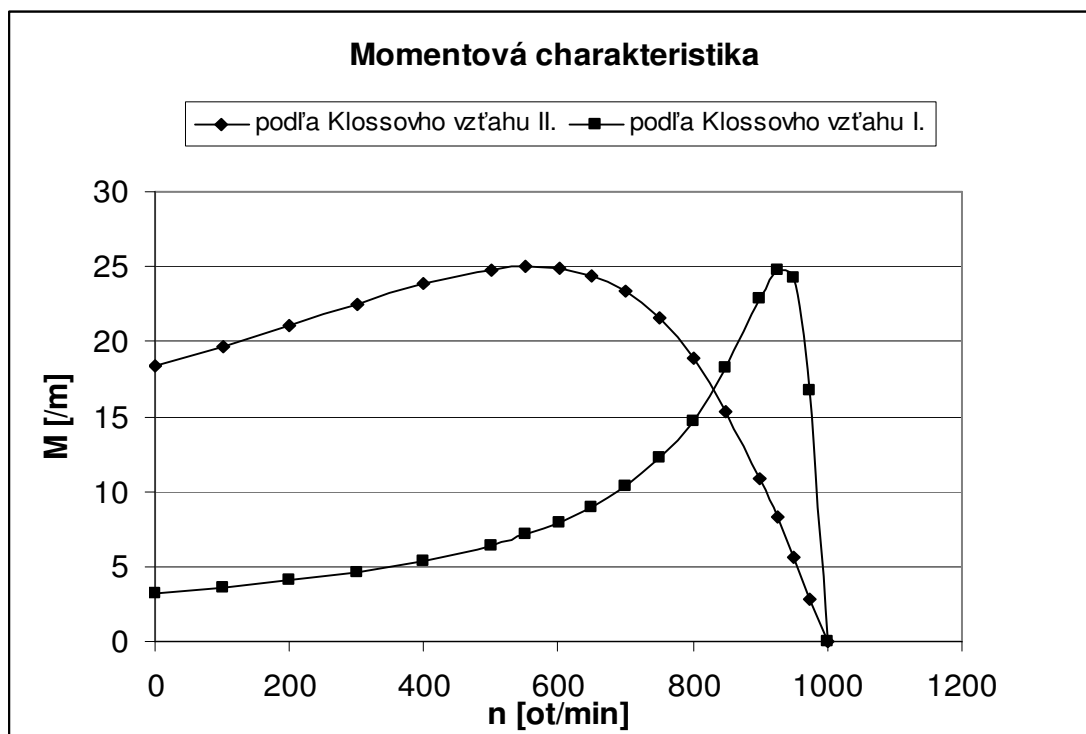
Sklz zvratu II.:

$$s_{zv} = \sqrt{\frac{1-s^2}{2 \ln(1/s)}} \quad (62)$$

Momentová charakteristika, ktorá bola určená podľa Klossova vzťahu sa zhoduje s momentovou charakteristikou podľa vzťahu (61):

$$M = \frac{3}{\omega_s} \cdot \frac{R_2'}{s} \cdot \frac{U_1^2}{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + (X_{1\sigma} + X_{2\sigma}')^2} \quad (63)$$

Pre uľahčenie výpočtu hodnôt bol zostavený matematický program pomocou programu MathCad . Výsledky momentovej charakteristiky sú na grafe č. 6.



Graf 6 : Momentová charakteristika pri rozdielnych s_{zv}

3.5 Asynchrónny motor pri nesínusovom napájaní

Pokiaľ je asynchrónny motor napájaný z meniča frekvencie, je výstupné napätie z meniča nesínusové a nie je možné použiť náhradnú schému podľa obrázka 8. Pri nesínusovom napájaní je vhodné asynchrónny motor v ustálenom stave charakterizovať náhradnými obvodmi s impedanciami odpovedajúcimi jednotlivým harmonickým zložkám, z ktorých je možné napr. vyjadriť harmonické straty. Výsledok môžeme dosiahnuť troma spôsobmi:

- modifikáciou odporov a reaktancií v náhradnej schéme pomocou vhodných činiteľov, ktoré rešpektujú nerovnomerné rozloženie prúdu a majú vplyv hlavne u vyšších frekvencií,
- náhradnou schémou s jednou rotorovou vetvou a premennými parametrami,
- náhradnou schémou s viacerými rotorovými vetvami.

Pri aplikácii náhradnej schémy s jednou rotorovou vetvou a premennými parametrami sú potrebné statorové a rotorové odpory, odpor vyjadrujúci straty v železe a magnetizačnú indukčnosť uvažovať závislé na frekvencii a rozptylovú indukčnosť statora a rotora závislú na frekvencii a prúde. K určení týchto závislostí je potrebné uskutočniť meranie pri synchrónnom chode naprázdno a meranie pri zabrzdennom rotore pri rôznych frekvenciách a statorových prúdoch. [8]

Takéto meranie je podstatne zložitejšie ako pri napájaní sínusovým napätím, pretože zdrojom premennej frekvencie je synchrónny generátor.

Vzhľadom k poruche motora nemohlo byť prevedené meranie pri nesínusovom napájaní, takže táto problematika je spracovaná čisto teoreticky.

3.5.1 Menič frekvencie

Menič frekvencie predstavuje základný a pritom najzložitejší prvok celej sústavy elektrického pohonu s asynchrónnymi motormi. Jeho úlohou je meniť sínusové napätie konštantnej frekvencie odoberanej z napájaciej siete, na napätie premennej frekvencie, čím dosahujeme plynulého riadenia otáčok motora pracujúceho v sústave elektrického pohonu. Použitím meniča frekvencie pri pohone s asynchrónnym motorom plníme súčasne dve funkcie: dodávame sústave elektrickú energiu, ktorá sa transformuje na energiu mechanickú a súčasne riadime veľkosť zvolenej premennej veličiny (napr. otáčky hriadeľa). Na výstupe motora sa vyskytujú tieto veličiny:

1. uhol natočenia hriadeľa φ
2. uhlová rýchlosť ω
3. moment dodávaný motorom poháňanému stroju
4. mechanický výkon P_2

Jednu z týchto veličín riadime, tzn. podľa určitého požiadavku meníme jej veľkosť v čase. Ďalšie veličiny potom závisia na charakteristike poháňaného zariadenia. Najčastejšie býva regulovanou veličinou uhlová rýchlosť.

V meničoch frekvencie sa požadované zmeny frekvencie napájacieho napätia dosahuje vhodnou kombináciou bezkontaktných prepínačov, alebo spínačov, osadených výkonovými polovodičovými súčiastkami, tj. tranzistory či tyristory.

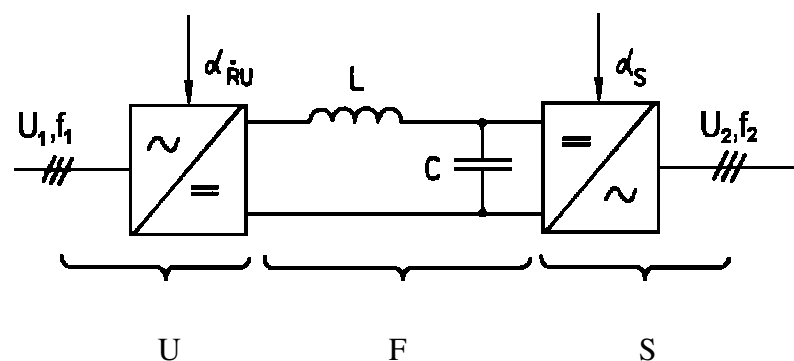
Rozdelenie frekvenčných meničov:

1. priame meniče kmitočtu (cyklokonvertory)
2. nepriame meniče kmitočtu:
 - nepriame meniče kmitočtu s prúdovým striedačom
 - nepriame meniče kmitočtu s napäťovým striedačom obr.(18).

U všetkých druhov meničov vzniká problém vyvolaný ich spoločnou vlastnosťou: požadované transformácie elektrickej energie dosahujú účelným spínaním polovodičových súčiastok čo nutne vedie ku vzorkovaniu elektrickej energie po skokoch. V dôsledku toho sa časový priebeh výstupnej veličiny meniča vždy viac či menej líši od jej ideálneho priebehu.

Ďalšie rušivé zložky výstupných veličín meničov vznikajú behom prechodných dejov a aj tieto zložky je nutné potlačiť účelným technickým opatrením. V obvodoch meničov sa tento účel rieši dvoma spôsobmi:

1. Riedenie meniča, kedy algoritmus spínania jednotlivých súčiastok je volený tak, aby dochádzalo k minimálnej deformácii časového priebehu výstupného napätia meniča v porovnaní s jeho ideálnym priebehom.
2. Vo výkonovom obvode meniča sa zapojujú filtre zložené z cievok a kondenzátorov [6].



Obr.16: Nepriami menič kmitočtu.

U- usmerňovač, F- jednosmerný medziobvod (filter), S- striedač

4 Záver

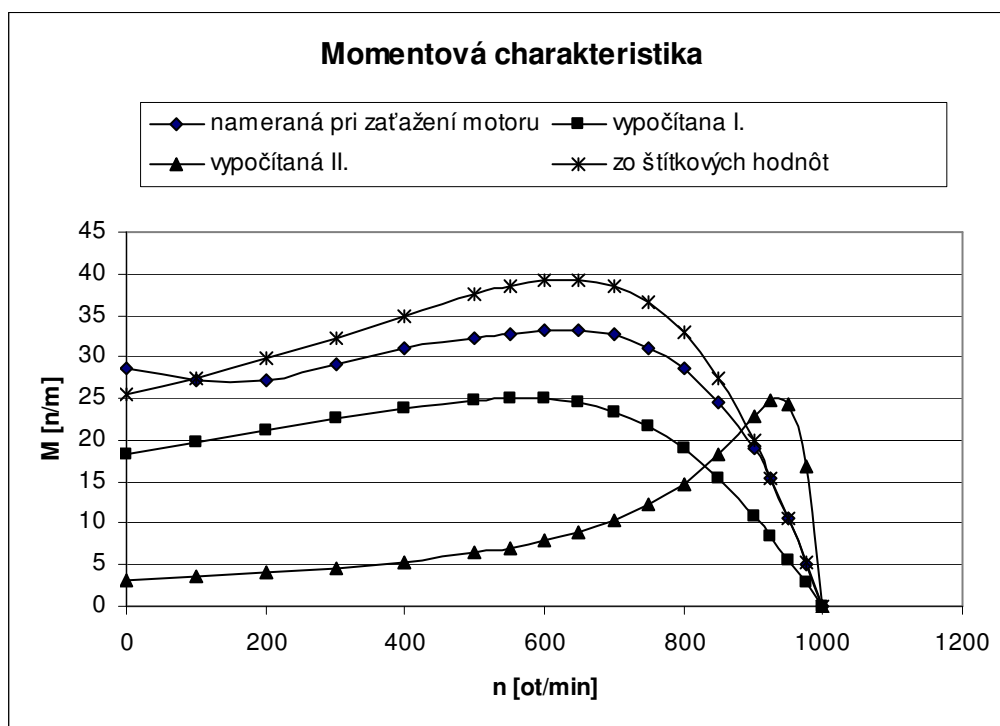
Úlohou tejto diplomovej práce bolo pokúsiť sa stanoviť jednoduchú metódu na výpočet parametrov asynchrónneho motora s jednou rotorovou vetvou. Identifikácia parametrov náhradného zapojenia spočívala v sklbení teórie, experimentálnych metód, znalosti konštrukcie asynchrónneho motora spolu s využitím štítkových hodnôt.

Stanovenie momentových charakteristík bolo prevedené:

1. výpočtom zo štítkových hodnôt graf (1)
2. výpočtom z parametrov náhradnej schémy (R_1 a $X_{1\sigma}$) a zo základných veličín použitého motora (otáčky, prúd, atď.) zmeraných z chodu naprázdno, nakrátko a pri zaťažení, viz. graf (6)

Pri výpočte sa vychádzalo z hodnôt, ktoré boli získané meraním a to z odporu sistorového vinutia R_1 a rozptylovej reaktancie $X_{1\sigma}$. Odpor reprezentujúci straty v železe bol odvodený z merania naprázdno. Pri výpočte rotorových veličín sa vychádzalo z náhradnej schémy asynchrónneho motora. Pre uľahčenie výpočtu bola paralelná vetva prepočítaná na sériové zapojenie. Výsledná momentová charakteristika bola zostrojená pomocou Klossovho vzťahu.

Pre overenie správnosti a použiteľnosti zvolených výpočtových metód bola nameraná skutočná momentová charakteristika. Porovnanie charakteristík je uvedené v grafe 7.



Graf 7: Momentová charakteristika.

Výsledky ukazujú, že najbližšie k skutočnej momentovej charakteristike je charakteristika vypočítaná zo štítkových hodnôt. Veľmi dobré zhody boli dosiahnuté hlavne v počiatočnej časti charakteristiky, tj. v oblasti malého zaťaženia motora a malých tepelných strát.

Najmenšiu zhodu so skutočnou charakteristikou vykazuje charakteristika určená výpočtom z náhradnej schémy, kde bol použitý na výpočet sklzu zvratu vzťah (60). Príčinou tohto rozdielu môžu byť značné nepresnosti v meraní parametrov náhradnej schémy. Základné výpočtové parametre ako sú impedancia a odpor statoru sú merané na motore v nezaťaženom stave a je možné predpokladať, že veľkosti týchto veličín budú závislé na teplote motoru takže bude dochádzať k zmene ich veľkosti pri behu motora, čo znamená tiež ich obmedzenú použiteľnosť. S týmto dobre súhlasí zväčšujúca sa odchýlka vypočítanej charakteristiky od reálnej pri zvyšovaní zaťaženia.

Pri použití tohoto výpočtového modelu je tiež nutné riešiť sústavu nelineárnych rovníc, čo komplikuje riešenie a znižuje využiteľnosť tejto metódy.

Lepšie výsledky sú dosiahnuté pri použití vzorca (62) pre sklz zvratu, ktorý vychádza z menovitých otáčok, čo znamená, že nie je citlivý na chybu merania a teplotu motora.

Na základe tejto diplomovej práce môžeme povedať, že táto metóda výpočtu nie je dostatočná a pri jej použití musíme počítať s istými nepresnosťami.

Literatúra

- [1] Pavelka, J., Čeřovský, Z., Javůrek, J.: Elektrické pohony, ČVUT, Praha 2001
- [2] <http://educon.zcu.cz/view.php?cislomodulu=2005112605>
- [3] Konečná, E., Richter, A.: Elektrické stroje, TU v Liberci 2000
- [4] Říha, J., Elektrické stroje a přístroje, Praha 1986
- [5] http://www.lef.um.savba.sk/Pribil/EaE05_P9.pdf
- [6] Bulgakov, A.A.: Řízení asynchronních motorů měniči frekvence, Praha 1989
- [7] <http://fei.vsb.cz/kat448/Studium/Materialy/VS/kap23.pdf>
- [8] Černý, V.: Asynchronní motory určené pro střídavé napětí., Elektrotechnický obzor
- [9] <http://fei1.vsb.cz/kat452/Vsb.cz/elektrotechnika/sylaby/Asynchronni%20stroje.pdf>
- [10] Hraško, P., Puzjak, I.: Elektro/technika, 2. vyd., Bratislava: Alfa 1987
- [11] Fetter, F.: Asynchronní motory, SNTL, Praha 1966
- [12] Konečná, E., Kubín, J., Endler, P.,: Porovnání způsobů určování parametrů asynchronního stroje.
- [13] Thorsen, O., Dalva, M.: Use of PWM-Inverter to determinane parameters for saturated induction machines with current displacement rotor, EPE Journal, Vol.8, A 3-4, September 1999
- [14] Měřička, J., Hamata, V., Voženílek, P.: Elektrické stroje, ČVUT, Praha 1997
- [15] Poliak, F., Fedák, V., Zboray, L.: Elektrické pohony, 1. vyd. Bratislava: Alfa 1987